

УДК 551.71:552.5(470.22)

## АРХЕЙСКИЕ МЕТАТЕРРИГЕННЫЕ ПОРОДЫ КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ: ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ, ГЕОХИМИЯ, ИСТОЧНИКИ СНОСА

© 2020 г. В. П. Чекулаев<sup>1</sup>, \*, Н. А. Арестова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: vpchekulaev@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2018 г.

После доработки 26.11.2018 г.

Принята к публикации 28.03.2019 г.

Проведено изучение геологии и состава архейских терригенных осадочных пород Карельской провинции Балтийского щита с целью установления их положения в строении зеленокаменных поясов и состава источников сноса. Показано, что метатерригенные породы зеленокаменных поясов наиболее молодого Центрально-Карельского домена совместно с вулканитами средне-кислого состава слагают главную часть разрезов, приурочены к их основанию и имеют возраст около 2745 млн лет. В поясах Западно-Карельского домена метатерригенные породы слагают верхние части разрезов, а их возраст составляет 2745–2750 млн лет. Геологические данные о положении метатерригенных пород в поясах наиболее древнего Водлозерского домена также указывают на их неоархейский возраст. На этом основании делается вывод, что метатерригенные породы начинают неоархейский этап корообразования Карельской провинции. Согласно геохимическим данным, в составе архейских метатерригенных пород всех трех доменов преобладают метаграувакки. В основании разрезов ряда структур присутствуют полимиктовые конгломераты с преобладанием галек тоналитов, трондjemитов и реже гранодиоритов (тоналит-трондjemит-гранодиоритовая (ТТГ) ассоциация) и подчиненным количеством магматических пород другого состава. Низкие содержания СаО и Na<sub>2</sub>O и значения химического индекса изменения CIA < 55 указывают на незначительную степень выветривания. Содержания Th, Co, Sc, Hf, La свидетельствуют о том, что во всех изученных структурах ведущую роль в составе источника сноса играли породы ТТГ-ассоциации. Влияние базитового источника невелико и сказалось исключительно на содержаниях Ti, Y и тяжелых РЗЭ в метатерригенных породах. Коматииты как источник обломочного материала не играли заметной роли.

**Ключевые слова:** Балтийский щит, Карельская провинция, архей, метатерригенные породы, геология, химический состав, источники сноса

**DOI:** 10.31857/S0869592X20040055

### ВВЕДЕНИЕ

Терригенные осадочные породы наряду с вулканитами являются главным источником информации об условиях образования континентальной коры. Особенно актуально это для палеотектонических реконструкций наиболее ранних, архейских, этапов ее формирования (Camire et al., 1993; Светова и др., 2001; Kontinen et al., 2007; Ножкин и др., 2010; Котова и др., 2016). Прогресс в таких исследованиях обеспечило применение современных геохимических и изотопных методов анализа, так как состав терригенных пород является результатом взаимодействия ряда факторов, таких как состав пород в источниках сноса и их соотношение, степень выветривания, процессы метаморфизма и метасоматоза и других. Характер и сочетание этих факторов определяются тектонической обстановкой. Поэтому надежным инстру-

ментом для палеогеодинамических реконструкций является, наряду с литологическим анализом терригенных пород, изучение их химического состава (Петтиджон, 1981; Bhatia, 1983; Bonjour, Dabard, 1991; Camire et al., 1993). Наибольшее значение приобретают геохимические исследования при изучении древних, особенно архейских, пород, часто значительно метаморфизованных и утративших свои текстурные признаки. В связи с этим для исследования используются породы, осадочная природа которых устанавливалась либо по наличию текстурных признаков, либо по параметрам состава, позволяющим различать магматические и осадочные породы, таким как химический индекс изменения CIA (Nesbitt, Young, 1982) и функция DF(x) (Великославинский и др., 2013).

Целью настоящей работы являются обобщение и сравнительный анализ имеющихся геоло-

гических и геохимических данных для метатерригенных пород, участвующих в строении архейских зеленокаменных поясов или отдельных структур, для оценки их возрастного положения и установления причин различий в их составе. В качестве объекта исследования выбраны архейские терригенные породы Карельской провинции Балтийского щита, преимущественно метаграувакки, которые несут наибольшую информацию о составе пород — источников сноса. Такое исследование позволит провести корреляцию терригенных пород в пространственно разобщенных зеленокаменных поясах, уточнить их возрастное положение и связь с окружающими магматическими комплексами пород. При характеристике метатерригенных пород авторы стараются не использовать приставку “мета”.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Восточная (архейская) часть Балтийского щита состоит из трех крупных, различающихся по строению провинций: Кольско-Норвежской (гранулит-зеленокаменная область), Беломорской (Беломорский складчатый пояс) и Карельской (гранит-зеленокаменная область) (Ранний..., 2005). Геохронологические и изотопно-геохимические исследования последних десятилетий показали, что наиболее широко архейские образования представлены в Карельской провинции, где их формирование происходило в интервале от 3240 до 2650 млн лет назад (Ранний..., 2005; Арестова и др., 2015), т.е. от палеоархея почти до границы архея и палеопротерозоя.

Как и все архейские гранит-зеленокаменные области, Карельская провинция состоит из гнейсо-гранитовых полей (ареалов), представленных в разной степени переработанными породами тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации, и разделяющих их зеленокаменных поясов, сложенных преимущественно супракрустальными породами. Главной особенностью провинции является гетерогенность ее строения, выраженная в присутствии крупных фрагментов коры (доменов или субпровинций), различающихся прежде всего временем формирования слагающих их комплексов пород и возрастом коры в целом: Водлозерского, Центрально-Карельского и Западно-Карельского (Лобач-Жученко и др., 2000б) (рис. 1). Учитывая эти различия, представлялось перспективным на основе комплекса данных провести сравнительное изучение метатерригенных пород разных доменов.

**Водлозерский домен** является наиболее крупным фрагментом палео-мезоархейской коры Карельской провинции и всего Балтийского щита (рис. 1) с широким развитием пород ТТГ-ассоциации, имеющих возраст цирконов более 3.0 млрд лет

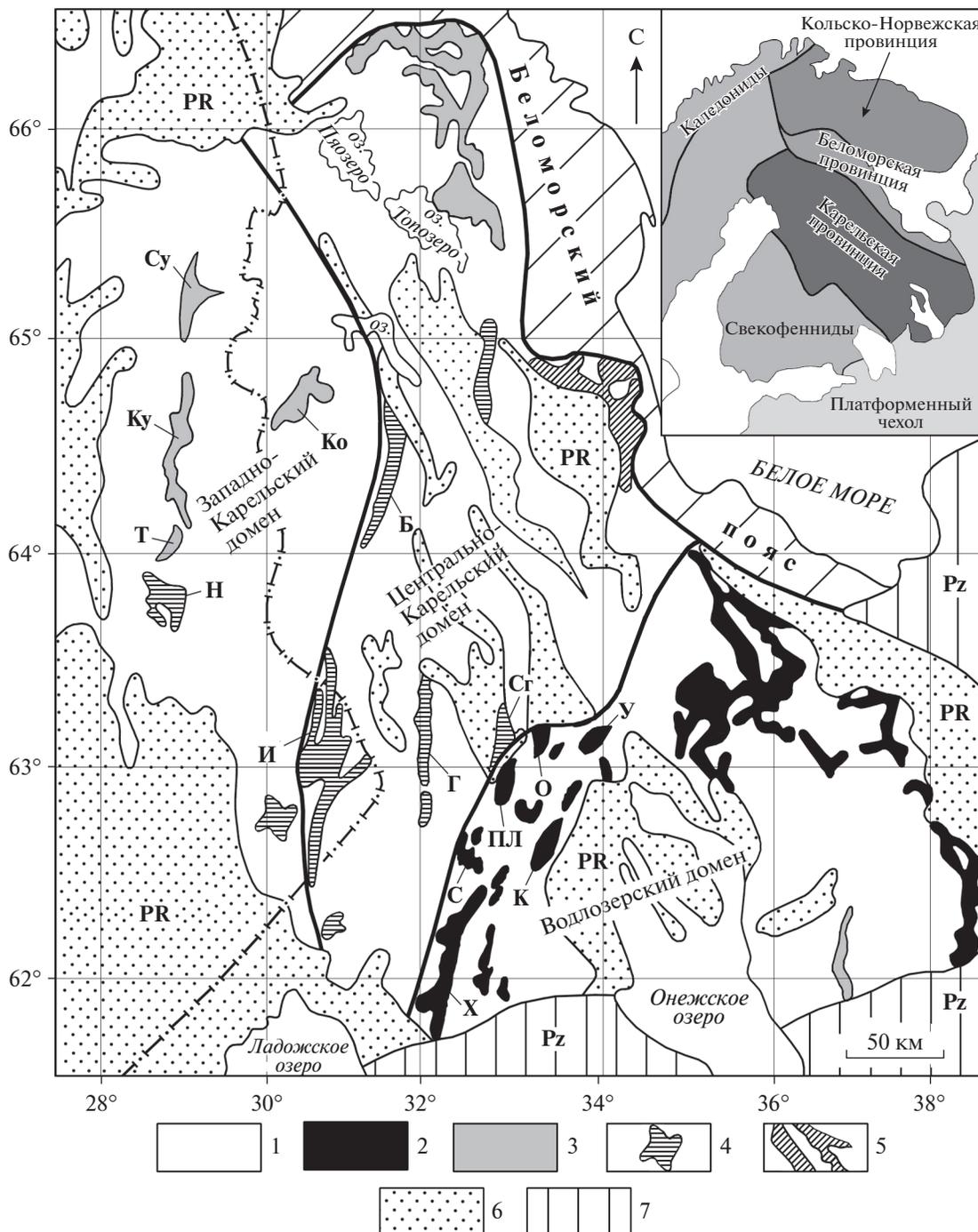
и неодимовый модельный возраст  $t_{Nd(DM)}$  в интервале 3.3–3.4 млрд лет (Лобач-Жученко и др., 2000б; Ранний..., 2005). Супракрустальные породы зеленокаменных поясов приурочены к краевым частям домена и представлены в основном вулканитами разного состава и возраста (Арестова и др., 2012, 2015). Терригенные породы в ограниченном количестве присутствуют лишь в некоторых зеленокаменных структурах западного обрамления домена вдоль границы с Центрально-Карельским доменом. Это структуры Хаутаваарская, Семченская, Койкарская, Остерская, Уросозерская, в которых возраст вулканитов составляет 2.9–3.02 млрд лет.

**Западно-Карельский домен** (рис. 1) представлен породами ТТГ-ассоциации и зеленокаменными структурами Восточной Финляндии (Кухмо, Суомуссалми, Типасъярви, Нурмес) и Западной Карелии (Костомукшская структура). В отличие от Водлозерского домена, возраст пород ТТГ-ассоциации и вулканитов Западно-Карельского домена в основном составляет около 2.8 млрд лет (Ранний..., 2005; Nuhma et al., 2012b), а модельный возраст  $t_{Nd(DM)}$  пород не превышает 2.95–3.0 млрд лет (Ранний..., 2005; Nuhma et al., 2012a). Терригенные осадочные породы в ограниченном количестве присутствуют в породах зеленокаменного комплекса Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви и в большем объеме в Костомукшской структуре Западной Карелии. Кроме того, они целиком слагают пояс Нурмес в Восточной Финляндии.

**Центрально-Карельский домен** занимает западную часть Республики Карелия, а также район Иломанси в Восточной Финляндии (рис. 1). Имеющиеся данные по геологии, возрасту и составу пород Центрально-Карельского домена показывают их заметное отличие от пород, развитых в прилегающих частях Водлозерского и Западно-Карельского доменов (Чекулаев и др., 2018). Главной особенностью Центрально-Карельского домена является то, что он сложен гранитоидами и подчиненными супракрустальными породами, возраст которых по цирконам не превышает 2.78 млрд лет а значения  $t_{Nd(DM)}$  не более 2.85 млрд лет, т.е. домен представляет фрагмент неархейской коры на Балтийском щите. Другой особенностью является то, что в составе супракрустальных пород зеленокаменных поясов преобладают метавулканиты среднего и кислого состава и терригенные осадочные породы (структуры Иломанси, Большозеро, Челмозеро-Нюк, Гимольская, Сегозерская), а коматиты и базальты имеют подчиненное значение.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Основой сравнительного изучения архейских терригенных пород Карельской провинции является их положение в разрезах супракрустальных по-



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Карельской провинции по (Кожевников, 2000), с упрощениями и дополнениями. 1 – гранитоиды; 2–5 – зеленокаменные пояса с возрастом 2.9–3.0 млрд лет (2), 2.8–2.85 млрд лет (3), около 2.75 млрд лет (4), неопределенного возраста (5); 6 – протерозой; 7 – платформенный чехол. Обозначения районов (структур): Су – Суомуссалми. Ку – Кухмо, Т – Типасъярви, Н – Нурмес, И – Иломанси, Ко – Костомукша, Б – Большозеро, Г – Гимолы, Сг – Сегозеро, У – Уросозеро, О – Остер, ПЛ – Палая Ламба, К – Койкары, С – Семчь, Х – Хаутаваара.

род. Однако именно это трудно определить в связи с наложенным метаморфизмом и сложной деформированностью пород в зеленокаменных структурах. Ниже дается краткая характеристика геологи-

ческого положения терригенных пород в отдельных структурах, участвующих в строении трех доменов. При этом рассматриваются лишь структуры, в которых эти породы играют заметную роль.

*Центрально-Карельский домен*

Наиболее широко терригенные породы представлены в Центрально-Карельском домене.

**Структура Иломантси.** Расположена в Восточной Финляндии, входит в состав крупного сланцевого пояса Хатту. Она хорошо изучена как геологически, так и геохимически (O'Brien et al., 1993). Структура сложена преимущественно вулканитами средне-кислого состава и метатерригенными породами с преобладанием метаграувакк, приуроченных к основаниям разрезов. Супракрустальные породы окружены или прорваны плутоническими породами ТТГ-ассоциации – тоналитами и гранодиоритами, а также интрузиями субщелочных санукитоидов, например интрузией Куйттила.

Возраст метаграувакк структуры Иломантси определялся по цирконам на примере района Хаттуваара. По морфологическим признакам цирконы метаграувакк имеют осадочное происхождение (Nuhma et al., 2012b). Большинство измерений возраста цирконов было выполнено в осцилляторно-зональных ядрах и соответствует значению 2.75 млрд лет, которое и рассматривается как верхний предел времени осадконакопления (Nuhma et al., 2012b). Возраст окружающих гранитоидов и даек, прорывающих вулканиты и терригенные породы, также около 2.75 млрд лет (O'Brien et al., 1993; Nuhma et al., 2012b), а их модельный возраст  $t_{Nd(DM)}$  равен 2.82 млрд лет (Nuhma et al., 2012a).

**Структура Большозера.** Представляет южную часть пояса Хедозеро–Большозеро–Челмозеро–оз. Нюк, который является продолжением пояса Иломантси, и сложена породами гимольской серии. Терригенные породы этой структуры, наряду с таковыми Костомукшской структуры, хорошо изучены (Милькевич, Мыскова, 1998) и представлены гнейсами, часто глиноземистыми, слагающими нижнюю часть разреза. Выше залегает толща метавулканитов разного состава. Структура располагается среди пород ТТГ-ассоциации, соотношения с которыми остаются неясными, и сечется небольшой субщелочной интрузией. По вулканитам получены три значения возраста:  $2749 \pm 5$  (Левченков и др., 2000),  $2730 \pm 5$  (Самсонов и др., 2001) и  $2706 \pm 17$  млн лет (Матреничев и др., 2008). Очевидно, что породы сформированы в неогарее, однако время вулканизма и, соответственно, осадконакопления остается не определенным.

**Структура Челмозеро–оз. Нюк.** Располагается в 10 км к северу от Большозерской на ее простирании, вероятно образуя с ней фрагменты единого пояса. Наиболее полный разрез супракрустальных пород этой структуры обнажен вдоль северо-западного разлома, контролируемого системой озер. Породы имеют моноклинальное залегание, причем терригенные породы слагают среднюю часть разреза и имеют мощность около 1000 м (Чеку-

лаев, 1988). Учитывая результаты реконструкции первичного состава метаморфизованных пород А.Н. Нееловым (1980), большинство супракрустальных пород структуры относятся к породам нормального осадочного ряда с широкой вариацией состава от глин до граувакк. Фундамент супракрустальных пород в данном районе не устанавливается. Породы прорваны Нюкозерской интрузией субщелочных санукитоидов, для которых определен возраст U–Pb методом (NORDSIM) по единичным зернам циркона  $2709 \pm 10$  и  $2716 \pm 11$  млн лет (Bibikova et al., 2005) и классическим U–Pb методом по цирконам  $2732 \pm 4$  млн лет (Чекулаев и др., 2004).

**Гимольская структура.** Занимает изолированное положение в центральной части Центрально-Карельского домена. Структура вытянута в субмеридиональном направлении и фактически представляет серию протяженных линз, приуроченных к узкой линейной зоне и сложенных супракрустальными породами. Их соотношение с окружающими гранитоидами не ясно. Согласно К.И. Хейсканену (1977), в основании разреза залегают полимиктовые конгломераты, сланцы и основные вулканиты, которые вверх по разрезу сменяются железистыми кварцитами и слюдястыми сланцами. Однако М.А. Гиляровой (1974) отмечалось наличие в конгломератах галек железистых кварцитов. Наиболее полно терригенные породы представлены в районе пос. Суккозеро, где наряду с конгломератами, в которых преобладают гальки гранитоидов, присутствуют метаграувакки и метаалевролиты. Необходимо отметить, что за глиноземистые породы в данном районе иногда принимаются сланцы – продукты кислотного выщелачивания тоналитов (Чекулаев, 1988).

**Сегозерская структура.** Расположена в восточной части Центрально-Карельского домена. Терригенные породы образуют полосу субмеридионального простирания вдоль западного побережья оз. Сегозеро. Эти породы слагают верхнюю часть разреза лопия, нижние части которого представлены различными гнейсами и амфиболитами и вулканогенным комплексом с преобладанием мета-базальтов (Глебова-Кульбах и др., 1963). Супракрустальные породы секутся Панозерской интрузией санукитоидов, для которой по циркону получены определения возраста в интервале от  $2727 \pm 4$  (Чекулаев и др., 2003) до  $2741 \pm 8$  млн лет (Bibikova et al., 2005). На юге породы структуры несогласно перекрываются палеопротерозойскими отложениями ятулия с корой выветривания в основании.

*Водлозерский домен*

В пределах Водлозерского домена терригенные породы отмечены преимущественно в зеленокаменных структурах его западного обрамления: Хаутаваарской, Койкарской, Остерской, Уросозерской и Семченской.

**Хаутаваарская зеленокаменная структура.** Расположена в южной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Терригенные породы присутствуют в средней части разреза (Светова и др., 2001), где они залегают на коматиитах и базальтах, имеющих возраст  $2980 \pm 99$  млн лет (Sm–Nd метод; Vrevsky et al., 1998), и представлены метаграувакками и графитистыми сланцами. Мощность горизонта метаграувакк варьирует от первых до сотен метров (Светова и др., 2001). Возраст терригенных пород оценивается косвенно по прорыванию вулканитов Хаутаваарским массивом санукитоидов ( $2744 \pm 5$  млн лет, Овчинникова и др., 1994;  $2742 \pm 23$  млн лет, Vibikova et al., 2005).

**Койкарская структура.** Располагается в средней части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса и, вероятно, является частью восточного продолжения крупной Семченской структуры. В одном случае терригенные породы образуют пачку, включающую кору выветривания и метаграувакки мощностью 70–100 м и залегающую на толще толеитовых базальтов и коматиитов (Светова и др., 2001). Возраст толщи, определенный Sm–Nd методом, составляет  $2921 \pm 55$  млн лет (Светов, Хухма, 1999). В другой части разреза терригенные породы, представленные полимиктовыми конгломератами, метааркозами и метаграувакками, трансгрессивно перекрывают вулканиты (Светова и др., 2001). Возраст вулканитов кислого состава составляет  $2860 \pm 15$  млн лет (Самсонов и др., 1996). Имеющееся измерение изотопного состава Sm и Nd в терригенных породах, давшее значение  $t_{Nd(DM)} = 2804$  млн лет (неопубликованные данные Р.И. Милькевич), указывает на их неoarхейский возраст. Это подтверждает отнесение метаграувакк Койкарской структуры к неoarхею (Светова и др., 2001).

**Уросозерская структура.** Располагается в северо-западном обрамлении Ведлозерского домена. Она имеет в плане изометричную форму, занимает площадь около  $10 \times 10$  км и, вероятно, представляет часть более крупной структуры, сохранившейся в виде фрагментов среди гранитоидов (рис. 1). Структура сложена метавулканитами разного состава, метатерригенными породами, а также небольшими линзовидными телами ультрамафитов. Возраст кислых вулканитов составляет  $2875 \pm 9$  млн лет, а время наложенного метаморфизма  $2709 \pm 8$  млн лет (Арестова и др., 2016). Супракрystalльные породы структуры прорваны телами метагаббро и секутся более поздними гранитоидами. Терригенные породы слагают небольшой выход среди метабазальтов на западном берегу оз. Урос и выходы северо-восточнее озера и представлены сложным комплексом тонкополосчатых полимиктовых метаалевролитов и метаграувакк, превращенных в кварц-альбит-мусковитовые сланцы, которые переслаиваются с кислыми вулканитами, образуя прослой мощностью в пределах первых метров.

Соотношение терригенных пород с толщей вулканитов, для которых определен возраст, не ясно.

**Остерская зеленокаменная структура.** Расположена к югу от оз. Сегозеро. Сама структура и участвующие в ее строении терригенные породы хорошо изучены (Геология..., 1978; Чекулаев и др., 2002). Главной особенностью структуры является наличие двух вулканоплутонических комплексов, разделенных пачкой полимиктовых конгломератов и ассоциирующих с ними метаграувакк. Соответственно, здесь четко устанавливается геологическое положение терригенных пород. Их нижняя граница фиксируется наличием в гальках конгломератов габбро-норитов с возрастом  $2860 \pm 9$  млн лет (Арестова и др., 2015), а верхняя – возрастом даек габбро  $2724 \pm 55$  млн лет (Арестова и др., 2017).

Полимиктовые конгломераты имеют суммарную мощность не менее 300–350 м и содержат прослой метаграувакк мощностью около 100 м. Общая площадь выхода терригенных пород в Остерской структуре около  $1 \text{ км}^2$  (Геология..., 1978). Гальки конгломератов размером от 0.05 до 0.8 м сложены метавулканитами разного состава, габбро, плагиопорфирами с преобладанием пород ТТГ-ассоциации.

#### *Западно-Карельский домен*

В пределах Западно-Карельского домена терригенные породы присутствуют в поясе Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви и поясе Нурмес на территории Финляндии и в Костомукшской структуре на территории России.

**Костомукшская зеленокаменная структура.** Расположена на западе Карелии вблизи границы с Финляндией. Она рассматривается различными исследователями либо как результат тектонического совмещения островодужной системы и океанического плюма (Puchtel et al., 1997), либо как продукт активной окраины континента (Самсонов и др., 2001), либо как самостоятельная рифтогенная структура (Лобач-Жученко и др., 2000а; Ранний..., 2005). Структура является одной из наиболее хорошо изученных в Карельской провинции благодаря связи с ней крупного железорудного месторождения. Нижняя часть разреза супракрystalльного комплекса представлена вулканогенной серией нижнего лопия (Раевская и др., 1992). Гимольская метаосадочная серия, слагающая верхнюю часть разреза, является стратотипом верхнего лопия (Общая..., 2002). Она представлена снизу вверх полимиктовыми конгломератами, железистыми кварцитами и ритмично-слоистыми сланцами. Имеется много определений возраста супракрystalльных пород структуры и гранитоидов. Возраст базальтов и коматиитов, определенный Sm–Nd методом, от  $2843 \pm 39$  млн лет

(Puchtel et al., 1997) до ~2.80 млрд лет (Samsonov et al., 1995; Лобач-Жученко и др., 2000а); возраст кислых вулканитов около 2.80 млрд лет (U–Pb метод по циркону; Лобач-Жученко и др., 2000а; Кожеников и др., 2006); возраст субщелочного массива Кургенлампи и дайки плагиогранитпорфира, прорывающих супракрустальные породы, в интервале от  $2707 \pm 9$  до  $2718 \pm 6$  млн лет (Лобач-Жученко и др., 2000а; Vibikova et al., 2005). Таким образом, время образования терригенных пород находится в интервале 2790–2720 млн лет.

**Зеленокаменный комплекс Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви.** Этот крупнейший в Финляндии зеленокаменный комплекс протягивается с юга на север примерно на 220 км при ширине до 10 км. Эволюция зеленокаменных поясов (или структур) была примерно одинаковой во всех частях комплекса. Начальный средне-кислый вулканизм имел место в интервале 2810–2790 млн лет назад. Главная фаза проявления вулканизма представлена толеитами, коматитами и коматитовыми базальтами с возрастом 2790–2770 млн лет (Rapunen et al., 2009). Метатерригенные породы имеют весьма ограниченное распространение и представлены метаграувакками. Время их образования оценивается интервалом 2750–2745 млн лет на основе определения возраста цирконов. Так, входящие в состав рассматриваемого пояса кварциты Арола содержат цирконы с возрастом от 2.70 до 3.45 млрд лет (Nuhma et al., 2012b), причем половина цирконов имеют возраст около 2.75 млрд лет. Метаграувакки структуры Типасъярви имеют возраст около 2750 млн лет (Nuhma et al., 2012b). Минимальный возраст терригенных пород определяется по секущей дайке лейкогранита, имеющего возраст  $2697 \pm 7$  млн лет. Учитывая, что возраст вулканитов около 2.8 млрд лет (Nuhma et al., 2012b), формирование терригенных пород оторвано во времени от образования вулканитов данного зеленокаменного комплекса.

**Парагнейсовый пояс Нурмес.** Расположен в Восточной Финляндии непосредственно к югу от зеленокаменного комплекса Типасъярви–Кухмо–Суомуссалми. Пояс сложен в основном мигматизированными парагнейсами с подчиненными амфиболитами и более молодыми гранитовыми интрузиями (Kontinen et al., 2007). Предполагается, что изотопный состав углерода указывает на биогенное происхождение парагнейсов. Согласно U–Pb датированию цирконов из меланосомы мигматитов и из гранитов, возраст парагнейсов составляет 2.71–2.69 млрд лет. Такое время седиментации подтверждается Sm–Nd возрастом по породе в целом  $2756 \pm 89$  млн лет (Kontinen et al., 2007).

Таким образом, метатерригенные породы в наибольшем объеме участвуют в строении зеленокаменных поясов Центрально-Карельского домена, где они совместно с вулканитами средне-кислого

состава слагают главную часть разрезов и залегают в их основании. Возраст терригенных пород оценивается около 2750 млн лет.

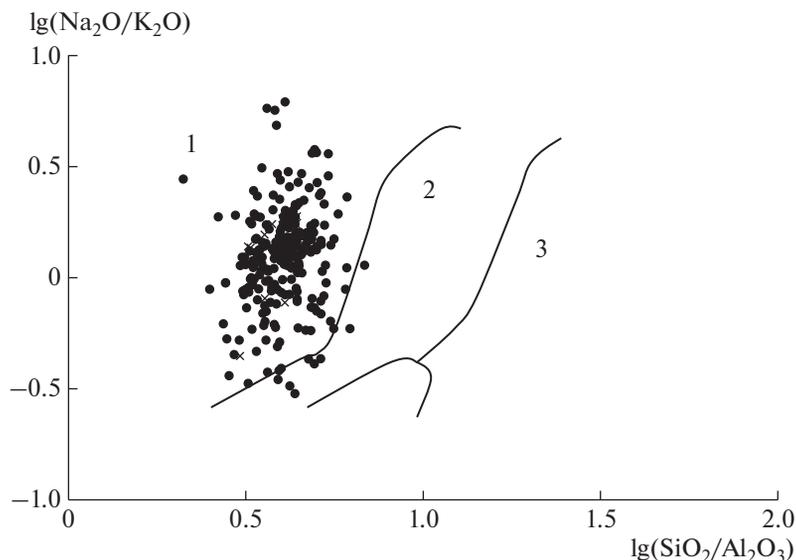
В поясах Западно-Карельского домена терригенные породы слагают верхние части разрезов и в заметном объеме присутствуют только в разрезе Костомукшской структуры. Возраст терригенных пород также около 2745–2750 млн лет. Исключение составляет пояс Нурмес, почти целиком сложенный парагнейсами, имеющими возраст 2.69–2.71 млрд лет.

Неясным остается возраст терригенных пород в Водлозерском домене. Это обусловлено, с одной стороны, сложным строением поясов, где практически отсутствуют нормальные стратиграфические соотношения пород, а с другой стороны, отсутствием непосредственных измерений возраста метаосадков. Не исключено, что в этих поясах геологические соотношения терригенных и вулканогенных пород являются результатом тектонического перемешивания, как это имеет место в зеленокаменном поясе Бёрч-Учи в провинции Сьюпериор в Канаде (Fralick et al., 2009). Таким образом, несмотря на присутствие терригенных пород в мезоархейских поясах, не исключается, что они имеют неоархейский возраст. Этому не противоречит время образования терригенных пород в Остерской структуре, которое оценивается интервалом 2724–2860 млн лет (Кучеровский, Арестова, 2018).

В разрезах терригенных пород преобладают метаграувакки, а в пределах всех доменов имеются зеленокаменные структуры, где в основании разрезов залегают полимиктовые конгломераты, гальки которых представлены преимущественно породами тоналит-грондземитового состава.

## ГЕОХИМИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Химический состав метатерригенных пород является функцией трех составляющих: (1) состава и соотношения источников сноса, (2) степени выветривания и (3) преобразования пород в результате метаморфизма или метасоматоза. Как было сказано выше, целью данной работы является сравнительный анализ терригенных пород, участвующих в строении архейских зеленокаменных поясов или отдельных структур разных доменов Карельской провинции, для установления причин различий в их химическом составе, выявленных в результате изучения архейских магматических пород провинции (Чекулаев и др., 2018). Отсюда вытекает проблема степени влияния на состав терригенных пород различий в химическом составе источников сноса. При этом задачей исследования не являлась палеогеодинамическая реконструкция условий осадконакопления. Это обусловлено, во-первых, общим недостатком аналитических данных для



**Рис. 2.** Классификационная диаграмма  $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  (Pettijohn et al., 1973) для архейских метатерригенных пород Карельской провинции. Поля на диаграмме: 1 – граувакки, 2 – литовые вакки, 3 – аркозы.

терригенных пород. Во-вторых, в случае архейских комплексов для таких реконструкций чаще используют состав метавулканитов. В Карельской провинции изучение магматических пород позволило установить, что в палео- и мезоархее основным геодинамическим механизмом была плюмтектоника (Лобач-Жученко и др., 2000б; Ранний..., 2005; Арестова и др., 2015), а при переходе к неоархею формирование пород происходило в условиях, близких к активной континентальной окраине (Чекулаев и др., 2018).

Трудности при изучении состава раннедокембрийских, в том числе терригенных, пород обусловлены обычными для них структурно-метаморфическими преобразованиями. В связи с этим особого внимания требует вопрос, насколько химический состав метатерригенных пород отражает состав и соотношение источников сноса. Представляется, что наиболее пригодными для нашего исследования являются метаграувакки, часто несущие информацию о комплексах пород, слагающих верхнюю часть коры на данном этапе эволюции. Благоприятным обстоятельством для решения этой задачи является то, что среди архейских метатерригенных пород Карельской провинции преобладают метаграувакки (Милькевич, Мыскова, 1998; Светова и др., 2001 и др.). Это подтверждает химический состав пород (рис. 2), а также высокие ( $>0$ ) значения функции  $DF(x)$ , позволяющей различить осадочные и магматические породы (Великославинский и др., 2013) (табл. 1, 2; рис. 3).

Для установления степени выветривания используется химический индекс изменения CIA (Nesbitt, Young, 1982). Так, осадочные породы

имеют в основном значения CIA больше 53, а значения  $DF(x) > 0$  (табл. 1, рис. 3). Как видно, все архейские терригенные породы Карельской провинции имеют низкие и довольно близкие значения индекса CIA, что указывает на незначительную степень выветривания. Это подтверждается достаточно высокими содержаниями  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$ , которые первыми уменьшаются при выветривании магматических пород. Это отмечалось раньше для осадков Костомукшской и Большозерской структур (Милькевич, Мыскова, 1998). Исключение представляют парагнейсы пояса Нурмес в Финляндии, для которых предполагается (Kontinen et al., 2007) участие биогенного фактора и для которых определен более молодой возраст седиментации, составляющий 2.71–2.69 млрд лет (Kontinen et al., 2007). Требуется объяснения также факт, почему большинство образцов пород Костомукшской структуры показывают отрицательные значения индекса  $DF(x)$ , характерные для магматических пород.

Таким образом, большинство метатерригенных пород Карельской провинции могут сохранять геохимические признаки пород – источников сноса. В то же время анализ состава архейских терригенных пород Карельской провинции затруднен, прежде всего, из-за существенных вариаций содержаний большинства элементов в пределах одной структуры или района, что видно из табл. 1, где приведены представительные анализы терригенных пород из разных районов всех трех доменов. Такие вариации проще всего объяснить разным составом и соотношением источников сноса. При этом некоторые особенности состава, например одновременно низкие содержания  $\text{CaO}$

Таблица 1. Сравнение средних составов метаграувак Карельской провинции и провинции Сьюперior

Домен	Западно-Карельский						Центрально-Карельский					
Район	Костомукша		Кухмо- Типасъярви		Нурмес		Большозеро		Иломанси		Сегозеро	
Компо- нент	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.
SiO <sub>2</sub>	61.77	4.46	64.75	6.79	62.71	3.50	64.66	6.38	64.43	3.74	60.58	5.18
TiO <sub>2</sub>	0.65	0.11	0.55	0.18	0.66	0.11	0.61	0.19	0.68	0.12	0.78	0.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.24	0.94	14.85	2.75	15.89	0.92	15.87	2.20	15.62	1.55	16.60	1.99
FeO <sub>tot</sub>	7.88	2.38	6.92	4.20	5.95	1.38	6.57	3.14	6.38	1.49	6.86	1.64
MnO	0.07	0.04	0.20	0.12	0.10	0.06	0.09	0.07	0.10	0.07	0.09	0.03
MgO	3.34	0.98	2.87	1.98	3.24	0.65	2.63	1.21	3.09	0.86	3.75	0.85
CaO	2.23	0.55	1.81	1.09	2.70	0.79	2.17	0.99	1.85	0.67	2.06	1.06
Na <sub>2</sub> O	3.13	0.71	1.63	0.79	3.38	0.79	2.71	0.95	2.52	0.63	3.02	1.16
K <sub>2</sub> O	2.35	0.53	2.95	1.15	2.81	0.50	2.35	0.98	2.29	0.61	2.38	1.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	0.10	0.04	0.14	0.06	0.11	0.04	0.12	0.03	0.16	0.08
mg#	0.43		0.41		0.49		0.41		0.46		0.49	
Rb	91	23	93	31	102	30	98	41	107	50	134	41
Sr	324	77	92	57	337	126	244	79	290	106	301	159
Ba	519	152	674	476	574	193	514	172	606	211	372	372
Y	16.9	2.7	17.8	8.2	16.6	5.9	14.6	3.5	13.4	9.5	13.5	3.5
Zr	131	29	139	52	151	20	128	19	117	17	125	11
Hf	2.87	0.34	7.00	0.40			3.80	1.01	3.40	0.58		
Sc	19.5	5.3	7.9	1.8	17.1	5.3	13.1	6.3	21.4	6.7		
Nb	7.3	1.6	12.9	4.2	5.3	1.8	8.5	1.8	14.3	7.1	6.5	0.6
Pb			17.9	10.0			11.4	2.7	15.7	7.7	23.0	7.0
Th	5.12	0.57	6.91	3.42	5.82	1.91	6.96	5.05	5.10	1.44	6.01	0.99
U	1.32	0.16	4.28	2.62	1.64	0.75	1.63	1.06	1.64	0.69	1.18	0.45
Ni	66	17	157	87	104	60	60	28	94	45	79	42
Cr	168	23	324	129	244	117	215	60	241	78	225	34
Co	25	8	32	19	31	14	22	10	28	9	24	12
V	137	38	87	49	150	42	100	41	156	41	142	41
La	21.1	7.24	34.1	17	25.0	16.5	24.7	17.0	19.8	5.8	5.59	
Ce	47.4	8.09	63.6	30	52.1	30.0	44.3	30.4	37.7	10.1	9.63	
Pr	6.33	0.86			5.93	3.38	8.11	5.13			1.18	
Nd	23.2	3.3	22.3	4.9	23.2	10.4	20.2	11.1	15.4	4.0	7.9	
Sm	4.25	0.48	3.88	0.8	4.12	1.26	3.38	1.49	3.19	0.66	1.64	
Eu	1.13	0.13	0.79	0.10	1.05	0.25	0.96	0.32	0.89	0.26	0.61	
Gd	3.50	0.51			3.66	1.18	3.27	2.15			1.32	
Tb	0.54	0.09	0.50	0.24	0.51	0.15	0.44	0.16	0.46	0.10	0.28	
Dy	2.83	0.44			2.67	1.07	2.24	1.36			1.77	
Ho	0.61	0.10			0.54	0.22	0.44	0.27			0.37	
Er	1.58	0.22			1.49	0.61	1.37	0.78			1.16	
Tm	0.23	0.03			0.22	0.10	0.21	0.10			0.17	
Yb	1.46	0.19	1.95	0.27	1.56	0.54	1.09	0.38	1.64	0.38	1.3	
Lu	0.24		0.34	0.05	0.23	0.04	0.18	0.05	0.27	0.04	0.21	
Sr/Y	19.6		5.71		25.38		18.2		31.8		21.3	
(La/Yb) <sub>n</sub>	10.3		11.46		12.92		15.0		9.9		3.08	
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	1.69		1.13		1.58		1.89		1.40		0.98	
Sm/Nd	0.18		0.19		0.19		0.18		0.21		0.21	
(La/Sm) <sub>n</sub>	3.15		5.14		3.75		5.0		4.0		2.20	
Zr/Y	7.9		9.15		10.87		9.2		11.9		9.6	
Cr/Ti	0.044		0.109		0.063		0.058		0.059		0.055	
Cr/Ni	2.65		1.88		2.48		4.04		2.98		3.39	
CIA	59.4		62.29		54.1		60.0		61.5		59.8	
DF(x)	-0.18		1.04		-0.40		0.22		0.51		1.33	
n (гл/ред)	26/23		15/14		29/29		60/28		68/68		20/4	

Таблица 1. Окончание

Домен	Водлозерский						Провинция Сьюпериор					
Район	Остер		Уросозеро		Койкары		Timiskaming		Kewagama		Pontiak	
Компонент	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.	среднее	Ст. от.
SiO <sub>2</sub>	63.44	8.41	71.22	4.27	58.47	7.35	64.9	1.3	66.3	2.8	64.3	3.8
TiO <sub>2</sub>	0.67	0.35	0.44	0.20	0.79	0.27	0.65	0.07	0.71	0.17	0.62	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.32	3.29	16.11	1.68	14.77	1.57	13.66	0.62	15.9	1.24	17.12	1.65
FeO <sub>tot</sub>	6.40	6.01	2.81	1.75	8.20	3.20	5.78	0.97	4.6	1.45	5.6	1.18
MnO	0.07	0.05	0.07	0.05	0.13	0.06	0.15	0.03	0.07	0.03	0.07	0.02
MgO	3.44	2.20	1.54	0.93	5.95	3.09	3.3	0.61	2.82	0.92	3.4	0.71
CaO	2.49	1.34	3.19	1.73	2.44	2.07	5	0.67	2.59	1.25	2.21	0.73
Na <sub>2</sub> O	2.84	0.71	0.95	0.66	3.01	1.39	4.32	0.72	4.12	1	3.53	0.91
K <sub>2</sub> O	2.16	1.12	1.66	1.08	0.92	0.89	1.4	0.32	1.89	0.94	2.6	0.9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.11	0.07	0.04	0.16	0.06	0.17	0.02	0.3	0.1	0.18	0.06
mg#	0.48		0.49		0.55		0.50		0.52		0.52	
Rb	83	50	60	32	33	24	50	15	87	35	82	30
Sr	96	40	87	44	60	50	565	171	361	289	378	82
Ba	416	248	143	54	291	192	610	108	1474	1047	775	294
Y	22.6	14.4	9.3	5.4	23.4	9.1	20	3	11	4	13	3
Zr	206	133	138	36	138	73	94	16	142	17	145	16
Hf	2.40	0.31	4.50	0.46	3.50	1.40	2.70	0.28	3.31	0.51	3.34	0.34
Sc	12.0	5.8			16.9	10.0	14	2	13	4	17	4
Nb	10.6	5.2	4.4	2.8	7.9	3.6	14.0	3.0	8.0	2.0	8.0	1.0
Pb			11.2	1.6	25.9	17.7						
Th	10.88	4.61	3.18	1.77	7.1	4.5	4.25	0.95	5.28	1.56	7.1	0.79
U	1.01	0.06			0.87	0.5	1.17	0.3	1.4	0.7	1.96	0.28
Ni	54	35	54	24	97	83	67	16	49	26	66	18
Cr	169	154	147	85	187	107	178	36	157	31	220	36
Co	12	10	8	3	34	23	23	2	15	7	23	6
V	77	52	67	27	163	76	101	11	85	0	144	8
La	6.5	3.8	6.6	3.6	23.7	13.6	27.2	4	23.8	8.6	24.8	8.2
Ce	14.8	6.7	13.8	5.0	51.1	29.6	56	8.3	51.6	17.2	45	15.5
Pr	2.01	0.72	1.45	0.52								
Nd	6.26	0.93	5.11	1.71	22.6	14.4	23	2.8	20.2	7.3	23.4	5.9
Sm	1.26	0.10	1.17	0.07	4.21	2.43	4.27	0.6	4.02	1.3	4.06	1.17
Eu	0.41	0.05	0.35	0.11	1.14	0.35	1.23	0.19	1.05	0.36	1.07	0.24
Gd	1.43	0.42	1.24	0.01								
Tb	0.27	0.08	0.22	0.05	0.58	0.09	0.5	0.08	0.52	0.32	0.4	0.08
Dy	1.28	0.23	1.48	0.74								
Ho	0.26	0.12	0.37	0.27								
Er	0.82	0.32	1.16	0.90								
Tm	0.12	0.05	0.22	0.19								
Yb	0.95	0.12	1.72	1.54	2.07	0.49	1.31	0.13	1.15	0.43	1.29	0.24
Lu	0.14	0.07	0.23	0.12	0.30	0.07	0.2	0.02	0.19	0.05	0.2	0.05
Sr/Y	6.4		15.4		2.6							
(La/Yb) <sub>n</sub>	5.38		5.8		9.15							
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	1.28		0.85		1.32							
Sm/Nd	0.20		0.24		0.22							
(La/Sm) <sub>n</sub>	3.27		3.61		3.59							
Zr/Y	9.28		23.5		6.03		4.9		14.7		11.2	
Cr/Ti	0.089		0.043		0.032							
Cr/Ni	3.35		2.35		6.14		2.67		2.25		3.75	
CIA	58.6		64.0		60.0							
DF(x)	0.81		1.14		0.73							
n (гл/ред)	15/8		19/19		25/9		9		25		26	

Примечание. Содержание редких элементов приведено в мкг/г; анализы пород провинции Сьюпериор по (Camire et al., 1993); CIA = 100 × [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)] по (Nesbitt, Young, 1982); DF(x) = -0.24SiO<sub>2</sub> - 0.16TiO<sub>2</sub> - 0.25Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0.28FeO - 0.3MgO - 0.48CaO - 0.79Na<sub>2</sub>O - 0.46K<sub>2</sub>O - 0.1P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + 26.64 по (Великославинский и др., 2013). n (гл/ред) – число анализов. Ст. от. – стандартное отклонение.

Таблица 2. Химический состав архейских терригенных пород Карельской провинции

Домен	Западно-Карельский												Центрально-Карельский											
	Костомукша						Кухмо-Типасъярви						Нурмес		Иломантси									
Район	1569/2		1569/11		7/97		1568/57		К-37-3/01		13	12	4	8	9	90	43С-PGN-	32-NUR-	15-NUR-	40A-NUR-	PAN-86-31			
№ пробы	1	1	1	1	2	2	1	1	2	3	3	3	4	3	3	4	90	90	91	91	91	91	5	5
Источ-ник	1	1	1	1	2	2	1	1	2	3	3	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5
SiO <sub>2</sub>	56.44	61.11	63.70	67.53	68.47	68.47	67.53	67.53	68.47	56.54	69.5	65.4	70	76.6	76.6	56.39	60.05	65.13	66.33	67.13	67.13	56.7	56.7	60.7
TiO <sub>2</sub>	0.76	0.66	0.66	0.59	0.61	0.61	0.59	0.59	0.61	0.75	0.55	0.73	0.43	0.31	0.31	0.8	0.83	0.59	0.57	0.52	0.52	0.84	0.84	0.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.41	16.92	16.20	15.11	15.04	15.04	15.11	15.11	15.04	19.91	13.2	15.6	14.7	15	15	15.64	16.61	15.57	15.61	15.35	15.35	16.1	16.1	20
FeO <sub>tot</sub>	9.43	7.25	6.20	5.24	5.85	5.85	5.24	5.24	5.85	6.8	5.49	5.45	3.40	1.69	1.69	10.07	8.28	5.46	4.88	4.29	4.29	10.26	10.26	5.67
MnO	0.1	0.07	0.14	0.03	0.12	0.12	0.03	0.03	0.12	0.13	0.1	<0.02	0.14	0.02	0.02	0.34	0.08	0.1	0.09	0.07	0.07	0.14	0.14	0.07
MgO	5.55	4.03	3.24	2.02	2.04	2.04	2.02	2.02	2.04	3.87	0.72	0.77	1.26	0.97	0.97	3.9	4.29	2.71	2.46	2.74	2.74	4.72	4.72	2.38
CaO	2.55	2.73	3.16	2.12	1.96	1.96	2.12	2.12	1.96	1.8	0.89	0.63	2.04	1.35	1.35	3.4	1.49	3.56	3.33	3.33	3.33	3.22	3.22	1.4
Na <sub>2</sub> O	2.9	3.21	2.66	3.89	2.92	2.92	3.89	3.89	2.92	1.69	0.97	0.92	1.14	1.43	1.43	1.65	2.46	2.83	3.2	3.36	3.36	2.36	2.36	1.79
K <sub>2</sub> O	2.21	1.86	1.74	1.79	2.21	2.21	1.79	1.79	2.21	4.68	3.9	4.55	2.65	0.61	0.61	3.16	3.49	2.51	2.55	2.23	2.23	1.91	1.91	3.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.01	0.15	0.02	0.12	0.12	0.02	0.02	0.12	0.1	0.15	0.16	0.1	0.03	0.03	0.08	0.05	0.12	0.13	0.15	0.15	0.1	0.1	0.19
ппп	2.98	1.55		1.38			1.38			3.2	2.85	5	3.1	2	2							2.3	2.3	3.1
mg#	0.51	0.50	0.48	0.41	0.38	0.38	0.41	0.41	0.38	0.50	0.19	0.20	0.40	0.51	0.51	0.41	0.48	0.47	0.47	0.53	0.53	0.45	0.45	0.43
Rb	83	61	71	67	83	83	67	67	83	121	101	150	70	20	20	106	163	79	68	67	67	130	130	130
Sr	287	286	325	331	270	270	331	331	270	75	10	40	60	110	110	224	132	187	361	395	395	180	180	400
Ba	659	460	271	432	257	257	432	432	257	1053	1613	490	300	100	100	654	461	452	624	490	490	310	310	780
Y	19	15	13	19	15.1	15.1	19	19	15.1	18	6.0	40	30	50	50	31	23	14	17	10	10	10	10	10
Zr	110	112	125	159	167	167	159	159	167	98	104	240	190	170	170	162	157	140	135	146	146	120	120	110
Hf	3.2	2.5		3.1			3.1			7.3	7.3	6.6	6.6	7.3	7.3	0.41	0.48	0.47	0.47	0.53	0.53	3.4	3.4	4.1
Sc	26	19		12			12			14	20	10	7.8	5.6	5.6	26	21	16	14	12	12	28	28	26.3
Nb	7	6	4.06	7	5.57	5.57	7	7	5.57	14	20	10	<10	20	20	2	5	4	4	4	4	20	20	20
Th	5.8	5.4	4.15	4.8	4.57	4.57	4.8	4.8	4.57	9	11	6.9	6.5	10	10	7.35	10.1	4.93	4.7	5.32	5.32	5.5	5.5	7.5
U	1.6	1.6	1.19	1.1	1.29	1.29	1.1	1.1	1.29	2.3	3.5	1.9	1.8	3.5	3.5	1.42	3.61	1.61	1.1	1.72	1.72	1.8	1.8	2.2
Ni	66	63		47			47			123	38	16	35	15	15	79	176	142	55	70	70	260	260	55
Cr	204	161		152			152			264	77	8.4	23	10	10	202	354	315	118	194	194	410	410	140
Co	27	16		33			33			34	18	17	11	4.9	4.9	40	35	30	15	21	21	47	47	26

Таблица 2. Продолжение

Домен	Западно-Карельский												Центрально-Карельский				
	Костомукша				Кухмо-Типасъярви				Нурмес				Иломантси				
Район	1569/2	1569/11	7/97	К-1568/57	К-37-3/01	13	12	4	8	9	37-PGN-90	43C-PGN-90	32-NUR-91	15-NUR-91	40A-NUR-91	P467/7,2	PAN-86-31
Источ-ник	1	1	2	1	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5
V	198	118	73	151	56	44	46	28	214	191	133	111	102	200	190		
La	23	25.3	1	20.2	37	33.5	28.1	37.2	28.8	24.3	14.3	24.4	25.3	21.6	20.4		
Ce	49	42	38	46.4	68	60	48	67	59.8	51.6	31.1	49	51.8	46	36		
Pr		6.33		5.22					7.2	6.02	3.39	5.86	5.83				
Nd	21	24	21	20.2	26	26	19	25	29.7	23.9	13.4	23.2	23.6	19	19		
Sm	4.6	4	3.5	3.6	4.2	5.09	3.67	5.92	6.14	4.96	2.77	4.41	4.06	4.01	3.2		
Eu	1.03	0.98	0.98	1.01	0.7	0.52	0.74	0.48	1.46	0.88	0.82	1.15	0.98	0.88	0.83		
Gd		4.06		2.79					5.37	4.61	2.19	3.91	3.4	0.5	0.4		
Tb	0.7	0.64	0.57	0.42	0.6	0.9	0.5	1.1	0.79	0.63	0.4	0.52	0.44	0.5	0.4		
Dy		2.67		2.42					5.93	3.04	2.35	2.28	2.43				
Ho		0.54		0.54					1.15	0.6	0.45	0.46	0.53				
Er		1.42		1.44					3.24	1.63	1.4	1.27	1.2				
Tm		0.21		0.22					0.54	0.21	0.24	0.2	0.22				
Yb	1.5	1.2	1.1	1.44	1.5	2.88	1.95	3.19	2.88	1.5	1.42	1.28	1.21	2.16	1.71		
Lu	0.26	0.21	0.2	0.22	0.4	0.48	0.34	0.57	0.44	0.21	0.2	0.22	0.17	0.34	0.31		
Rb/Sr	0.29	0.21	0.22	0.31	1.61	3.75	1.17	0.18	0.47	1.23	0.42	0.19	0.17	0.72	0.33		
Sr/Y	15.1	19.1	17.4	17.9	4.2	1.0	2.0	2.2	7.2	5.7	13.4	21.2	39.5	18.0	40.0		
Na/Ca	1.14	1.18	1.83	1.49	0.939	1.460	0.559	1.059	0.485	1.651	0.795	0.961	1.009	0.73	1.28		
Ti/Zr	40.6	34.7	21.8	21.5	45.0	17.9	13.3	10.7	29.0	31.1	24.8	24.8	20.9	41.2	46.5		
(La/Yb) <sub>n</sub>	11.0	13.7	0.7	10.1	8.54	8.34	10.34	8.36	7.17	11.62	7.22	13.67	15.00	7.2	8.6		
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	2.12	2.42	1.90	1.33	1.30	1.42	1.17	1.57	1.25	1.91	1.28	1.85	1.65	1.05	1.06		
(La/Sm) <sub>n</sub>	3.2	3.7	0.2	3.62	4.14	4.25	4.94	4.06	3.03	3.16	3.33	3.57	4.02	3.5	4.1		
Zr/Y	5.8	7.5	8.4	11.1	5.4	6.0	6.3	3.4	5.2	6.8	10.0	7.9	14.6	12.0	11.0		
Cr/Ti	0.046	0.041	0.044	0.060	0.024	0.002	0.009	0.005	0.043	0.073	0.091	0.035	0.063	0.083	0.027		
Cr/Ni	3.09	2.56	3.23	2.15	2.03	0.53	0.66	0.67	2.56	2.01	2.22	2.15	2.77	1.58	2.55		
ClA	58.2	58.0	55.4	64.3	64.2	67.3	63.5	73.3	56.0	61.2	52.9	52.6	52.3	57.7	68.5		
DF(x)	0.03	-0.30	-0.43	-0.18	1.82	2.03	1.66	1.63	0.68	0.07	-0.43	-0.69	-0.71	0.29	0.95		

Таблица 2. Продолжение

Домен	Центрально-Карельский										Водлозерский						
	Иломангси		Большоезеро			Лен-деры	Челм-озеро	Ги-молы	Остер		Семь	Урос-озеро	Койкары				
№ пробы	P462/ 7,5	P401/ 4,5	P454/5, 7	624	601	6016	421-88	401-15	436	1	2/14	А-4	1-10/21	29-2с	28-3с	26-с	5716
Источ-ник	5	5	5	1	1	1	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7
SiO <sub>2</sub>	62.6	65.1	68.4	60.09	62.18	66.9	65.06	78.29	81.99	70.6	73.4	69.35	65.9	53.68	61.72	65.82	67.9
TiO <sub>2</sub>	0.77	0.77	0.7	0.79	0.65	0.49	0.68	0.11	0.26	0.38	0.41	0.22	0.36	0.77	0.74	0.51	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.5	15	14.1	17.74	15.99	14.89	16.39	12.58	9.26	12.58	13.63	16.4	20.5	0.65	15.22	16.64	15.56
FeO <sub>tot</sub>	6.30	6.77	6.26	7.34	8.38	6.31	5.32	0.47	1.06	4.53	2.92	1.79	3.08	6.22	5.78	4.95	4.03
MnO	0.07	0.09	0.09	0.08	0.09	0.06	0.08	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.0866	0.16	0.08	0.05	0.07
MgO	3.31	3.24	2.84	3.29	2.88	2.33	2.46	0.29	0.94	3.14	1.63	1.37	1.99	5.86	4	2.36	1.74
CaO	1.39	2.06	2.71	1.91	1.72	2.56	3.23	0.25	1.23	2.04	2.79	1.94	3.79	5	2.28	0.57	0.71
Na <sub>2</sub> O	2.04	2.8	2.52	3.95	3	3.14	2.68	2.77	2.67	3.04	3.10	3.96	0.38	2.71	3.19	4.12	5.73
K <sub>2</sub> O	2.73	1.59	1.61	2.63	3.4	1.96	2.25	4.70	0.89	2.04	0.69	2.1	1.14	1.81	2.54	1.5	1.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.09	0.1	0.2	0.13	0.11	0.10	0.19	0.04	0.07	0.06	0.02	0.0885	0.21	0.24	0.1	0.23
лпш	2.5	2	1.6	1.84	2.04	1.09	0.96	0.33	1.58		1.08	1.64		7.86	3.98	2.77	1.73
mg#	0.48	0.46	0.45	0.44	0.38	0.40	0.45	0.52	0.61	0.55	0.50	0.58	0.54		0.55	0.46	0.44
Rb	110	70	110	95	148	77	93	153	46.7	55	26.3	59.3	69.4	36	127	2	35
Sr	300	210	210	259	284	375	311	63	5.68	121	105	257	71.1	79	7	20	171
Ba	640	370	230	553	766	425	606	524	348	296	75.1	415	181	265	1186	327	546
Y	10	20	50	15	12	11	7.9	8.4	26.4	11	7.79	5.79	14.8	32	40	10	27
Zr	160	110	180	132	109	113	115	92	209	90	72.6	78.7	92.3	190	191	65	224
Hf	3.3	3	3.9	3.2	3.3	2.9	2.78	2.81	5.44	2.4		2.21	5.26	4.1	4.7	3.6	5.4
Sc	21.8	19.9	14.8	20	17	13				12				1.4	16.5	15.5	10.5
Nb	20	10	20	7	9	6	5.60	5.1	8.65	5	6.01	3.03	6.13	10	14	8	9
Th	6.3	4	5.6	5.5	4.4	3	6.80	5.53	3	12	4.03	4.1	5.26	6.3	7.4	3.8	7.3
U	1.9	1.6	2.5	1.4	0.97	0.7	1.96	1.60	0.77	0.97	1.05	1.8		0.67	1.9	1	1.1
Ni	120	120	110	69	54	34	57	6	2.9	29	64.3	40.5	33	107	26	32	14
Cr	240	250	300	260	213	169	157	5	6.59	244	141	54.6	132	295	33	145	29
Co	32	29	29	28	27	20	29.50	0.50	4.41	12	11.1	37.5	10.7	25	1	15	10
V	160	150	120	116	59	35	147	4.44	7.97	66	70.6	61.3	83.6	134	10	123	115
La	27	13.7	19.5	20	9.9	8.5	10.20	27.9	8.37	3.8	9.22	6.53	4.08	26.4	23.1	16.7	29.2

Таблица 2. Окончание

Домен	Центрально-Карельский										Водлозерский					
	Иломангси			Большоезеро			Лендеры	Челмозеро	Гимолы	Остер	Семьч	Уросозеро	Койкары			
Район	P401/4,5			601			421-88	401-15	436	1	A-4	1-10/21	28-3с	29-2с	26-с	5716
№ пробы	P462/7,5	P454/5,7		624	601	6016	421-88	401-15	436	1	A-4	1-10/21	28-3с	29-2с	26-с	5716
Источник	5	5	1	1	1	1	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7
Ce	61	30	39	23	20	20	21.7	30.8	21.1	10	13.5	10.2	57.1	57.1	35.7	58.7
Pr	19	16	20	12	9.4	9.4	2.67	4.48	2.28	2.01	1.5	1.08				
Nd	4.17	3.07	4	2.6	1.75	1.75	10.20	16	9.37	5.6	5.37	3.9	20.8	20.8	11.9	21.7
Sm	1.31	0.89	1	0.88	0.78	0.78	1.77	2.23	2.23	1.19	0.99	1.12	3.71	3.71	4.84	4.16
Eu	0.5	0.5	0.51	0.45	0.31	0.31	0.63	1.50	0.59	0.44	0.59	0.27	0.93	0.93	1.23	1.2
Gd							1.30	1.75	2.8	1.43	0.85	1.24				
Tb							0.25	0.22	0.56	0.33	0.14	0.25	0.58	0.58	0.46	0.62
Dy							1.40	1.28	4.08	1.28	1	2				
Ho							0.27	0.25	0.95	0.26	0.2	0.56				
Er							0.88	0.82	2.78	0.82	0.6	1.79				
Tm							0.14	0.14	0.45	0.12	0.098	0.35				
Yb	1.75	1.67	1.1	0.77	0.85	0.85	0.99	0.97	3.05	0.8	0.68	2.81	2.43	2.43	2.42	2.37
Lu	0.26	0.29	0.19	0.13	0.15	0.15	0.18	0.15	0.46	0.14	0.12	0.38	0.34	0.34	0.36	0.31
Rb/Sr	0.37	0.33	0.37	0.52	0.21	0.21	0.300	2.43	8.22	0.45	0.23	0.98	0.46	0.46	18.40	0.20
Sr/Y	30.0	10.5	17.3	23.7	34.1	34.1	39.4	7.5	0.2	13.5	44.4	4.8	2.5	2.5	2.0	6.3
Na/Ca	1.47	1.36	2.07	1.74	1.23	1.23	0.83	10.92	2.17	1.11	2.041	0.10	0.54	0.54	7.23	8.07
Ti/Zr	28.3	41.2	35.2	35.1	25.5	25.5	35.3	7.3	7.5	33.5	16.8	23.7	23.8	23.8	46.1	17.1
(La/Yb) <sub>n</sub>	11.1	5.9	13.0	9.2	7.2	7.2	7.39	20.63	1.97	8.27	6.89	1.04	7.79	7.79	6.85	8.84
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	1.30	1.63	2.11	2.66	1.66	1.66	1.15	1.03	0.83	1.19	0.94	0.40	1.08	1.08	1.39	1.19
(La/Sm) <sub>n</sub>	4.2	3.2	3.2	2.5	3.1	3.1	3.72	8.08	2.42	4.48	4.26	2.35	4.59	4.59	3.08	4.53
Zr/Y	16.0	5.5	8.8	9.1	10.3	10.3	14.6	11	7.92	9.3	13.59	6.2	5.94	5.94	4.78	8.30
Cr/Ti	0.053	0.055	0.056	0.056	0.056	0.056	0.039	0.007	0.093	0.058	0.041	0.060	0.065	0.065	0.008	0.01
Cr/Ni	2.00	2.08	3.77	3.94	4.97	4.97	2.74	0.8269	2.27	2.19	1.348148	4.00	2.76	2.76	1.27	2.07
ClA	66.4	59.8	58.1	57.7	55.5	55.5	56.3	55.5	55.0	55.5	57.1	70.1	49.5	49.5	63.8	56.8
DF(x)	0.81	0.33	-0.65	-0.37	-0.30	-0.30	-0.11	-0.02	0.91	-0.05	-0.08	1.53	0.93	0.93	0.28	-0.67

Примечание. Содержание редких элементов приведены в мкг/г; CIA =  $100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$  по (Nesbitt, Young, 1982); DF(x) =  $-0.24SiO_2 - 0.16TiO_2 - 0.25Al_2O_3 - 0.28FeO - 0.3MgO - 0.48CaO - 0.79Na_2O - 0.46K_2O - 0.1P_2O_5 + 26.64$  по (Великославинский и др., 2013). Источники: 1 – Милькевич, Мыскова, 1998; 2 – Samsonov et al., 2005; 3 – Rapunen et al., 2009; 4 – Kontinen et al., 2007, табл. 5; 5 – O'Brien et al., 1993; 6 – оригинальные данные; 7 – Светов, Светова, 2004.

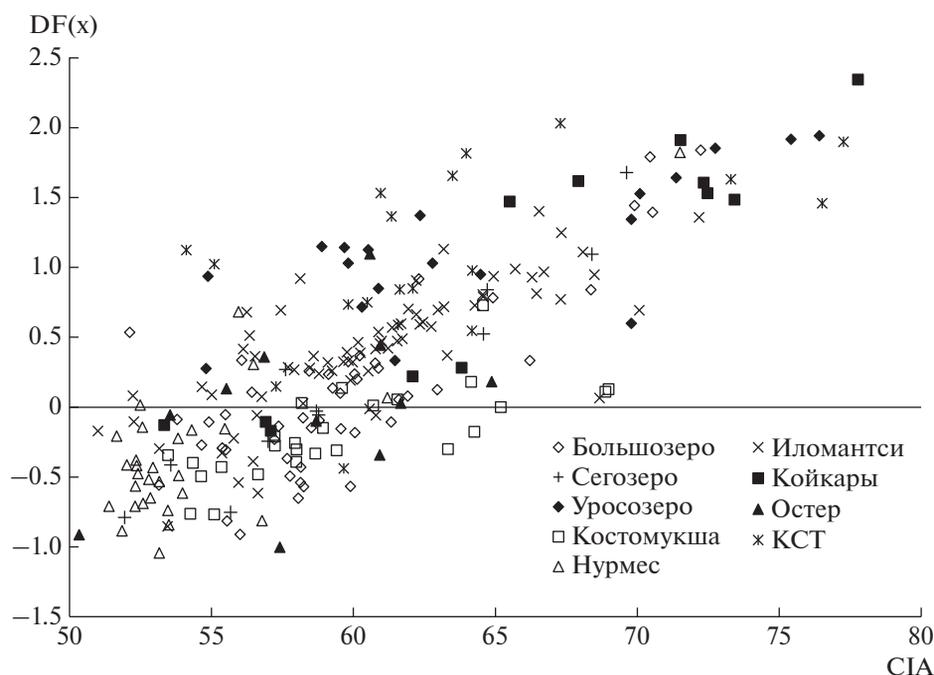


Рис. 3. Диаграмма CIA–DF(x) для архейских метатерригенных пород Карельской провинции. КСТ – Кухмо–Суомусалми–Типасъярви.

и  $\text{Na}_2\text{O}$  при не слишком высоких содержаниях  $\text{SiO}_2$ , связаны, скорее всего, с кислотным выщелачиванием в результате наложенных процессов. Такие породы мы старались исключить из исследования. Другой причиной вариаций может быть различие в методиках и точности измерений отдельных элементов, в первую очередь редких и редкоземельных. Например, в близкорасположенных структурах пояса Кухмо–Суомусалми–Типасъярви наблюдаются необъяснимые различия в содержаниях Sr и Ni. Вторым моментом, затрудняющим сравнительное изучение архейских метатерригенных пород в разных доменах, является их крайне неравномерная геохимическая изученность в отдельных зеленокаменных структурах. Особенно это касается недостатка аналитических данных по содержаниям редкоземельных элементов. В связи с этим ниже дается характеристика лишь тех структур, для которых имеется достаточно аналитических данных. Средние составы метаграувакк этих структур приведены в табл. 2, где для сравнения показаны также средние анализы архейских терригенных пород некоторых районов провинции Сьюпериор, Канадский щит по (Camire et al., 1993).

Как видно из табл. 2, средний состав метаграувакк, в том числе провинции Сьюпериор, приближается к нижнему пограничному составу тоналита с содержанием  $\text{SiO}_2$  62–64 мас. %. Исключение составляют метаграувакки в поясах западного обрамления Водлозерского домена, где терригенные по-

роды Уросозерской структуры ближе к составу трондьемитов, а терригенные породы Койкарской структуры отличаются наиболее основным составом, что, соответственно, отражается на содержаниях FeO, MgO, CaO. Эти же породы являются наиболее магнезиальными ( $\text{mg}\# = 0.55$ ), но с невысокими содержаниями Sr и Ni, что не совсем понятно. Обращает на себя внимание низкое содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  в метатерригенных породах Уросозерской структуры. Оно не может быть объяснено влиянием наложенных процессов, так как сохраняется в большинстве образцов и не сопровождается уменьшением содержания CaO. Можно отметить также более низкие содержания  $\text{K}_2\text{O}$  в терригенных породах обрамления Водлозерского домена по сравнению с таковыми двух других доменов, что видно на серии парных диаграмм (рис. 4), на которые нанесены средние составы пород с близкими содержаниями  $\text{SiO}_2$ .

Терригенные породы Водлозерского домена содержат также меньше литофильных элементов Rb, Ba, Sr (рис. 4). Более высокое содержание Sr наблюдается в терригенных породах Центрально-Карельского домена и прилегающей к нему с запада Костомукшской структуры. Это может быть связано с повышенным содержанием Sr в неоархейских тоналит-трондьемитах и средне-кислых вулканитах Центрально-Карельского домена (Чекулаев и др., 2018).

Наряду с литофильными элементами, терригенные породы Центрально-Карельского домена

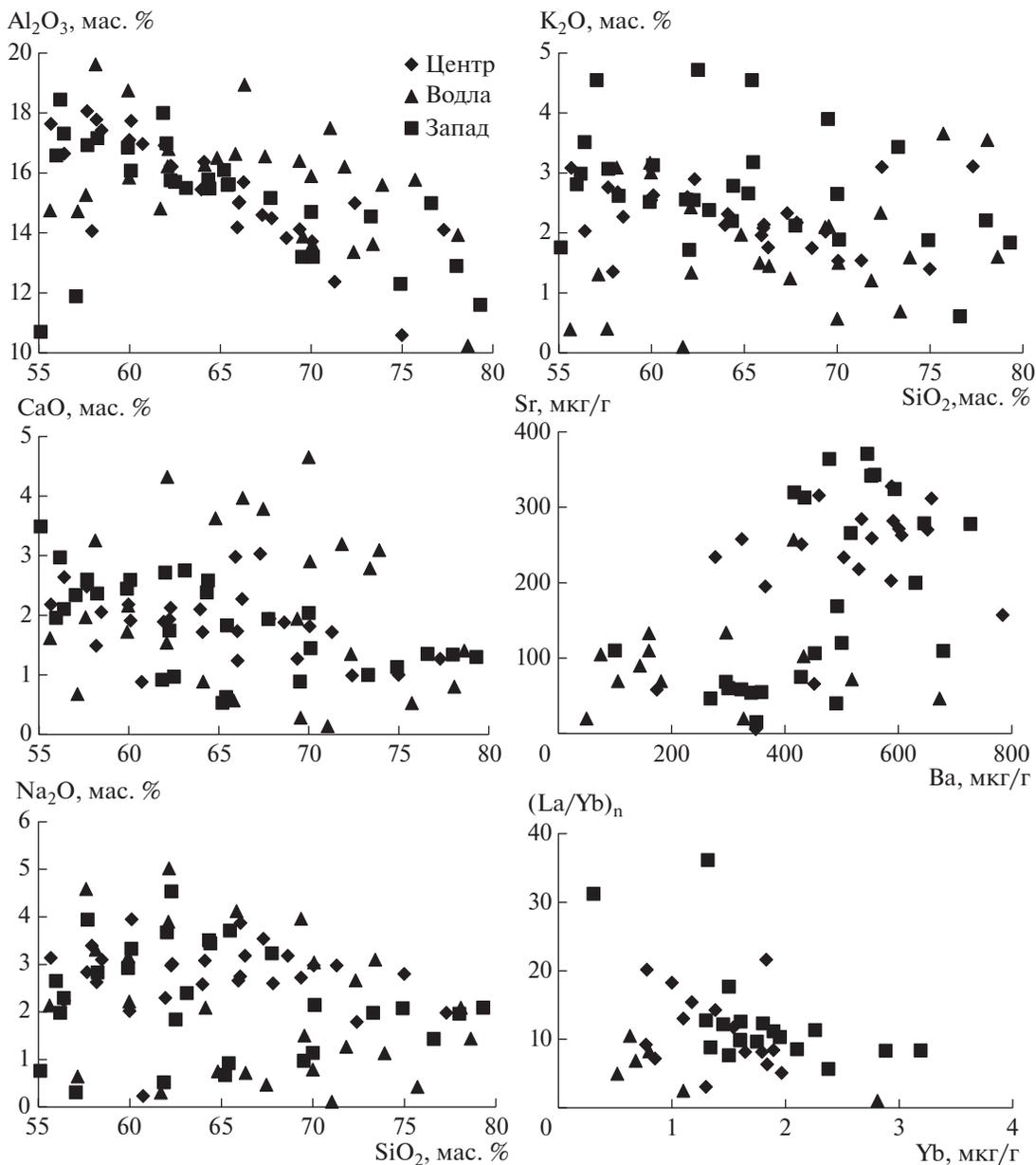


Рис. 4. Парные диаграммы для метатерригенных пород Центрально-Карельского (Центр), Водлозерского (Водла) и Западно-Карельского (Запад) доменов Карельской провинции.

и Костомукшской структуры обогащены легкими РЗЭ по сравнению с терригенными породами структур западного обрамления Водлозерского домена (рис. 5). Исключение составляют метагравиты Койкарской структуры, которые характеризуются высокими содержаниями La и Ce, что находится в противоречии с низкими содержаниями в них SiO<sub>2</sub> (около 58.5 мас. %) и, вероятно, может быть объяснено лишь специфическим составом источников сноса.

Содержания высокозарядных (HFS) элементов Ti, Zr, Y не показывают заметных вариаций в

терригенных породах всех доменов, за исключением пород Семченской и Уросозерской структур, содержащих меньше Y (табл. 2). Не наблюдается также какой-либо закономерной взаимосвязи между содержаниями MgO, Cr, Ni и магнезиальностью (mg#). Особенно разительные контрасты между содержаниями Cr, Ni и отношением Cr/Ni наблюдаются в поясе Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви в Восточной Финляндии. Это пока не находит геологического объяснения и, возможно, связано просто с аналитическими ошибками, что необходимо иметь в виду при палеогеодинамических реконструкциях.

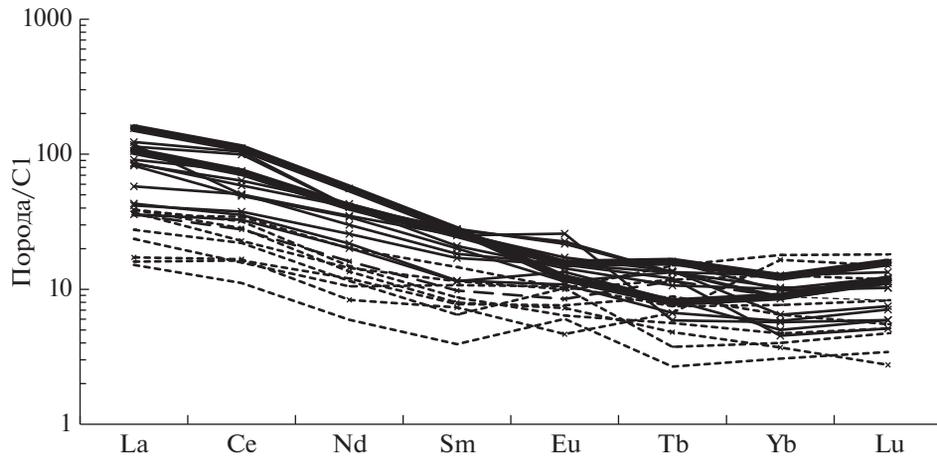


Рис. 5. Нормированные на хондрит C1 (по Sun, McDonough, 1989) спектры распределения РЗЭ в метатерригенных породах Центрально-Карельского (сплошная линия), Водлозерского (пунктирная линия) и Западно-Карельского (поле между жирными линиями) доменов Карельской провинции.

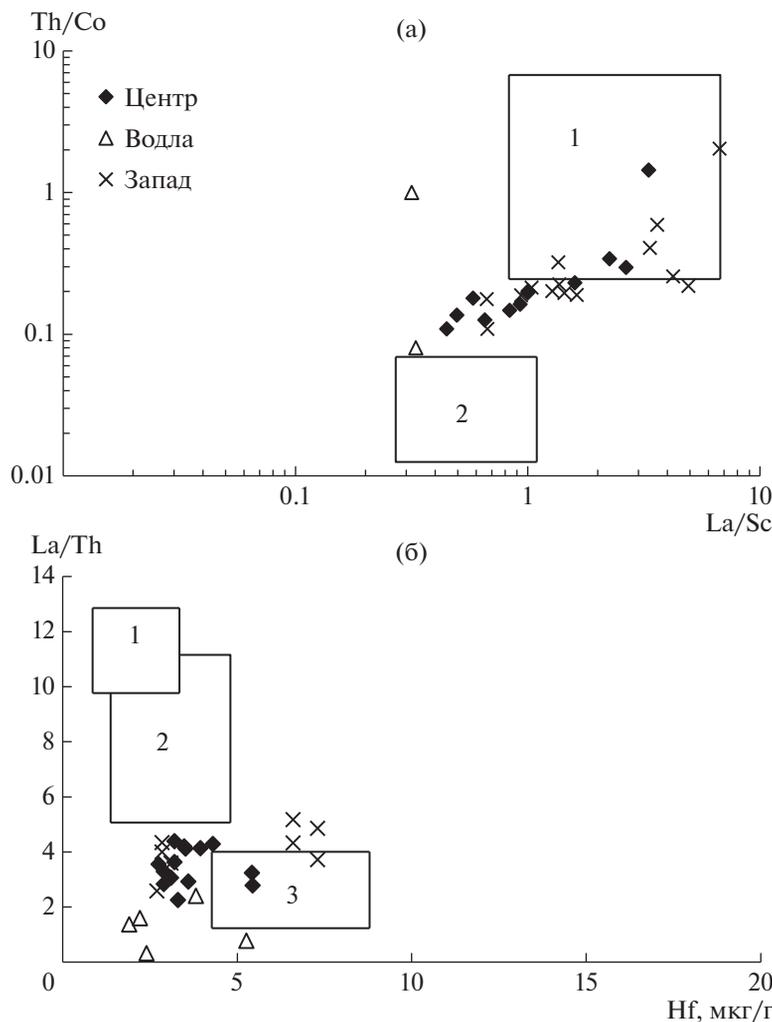
## ОБСУЖДЕНИЕ

Судя по средним составам терригенных пород (табл. 2), среди вероятных источников сноса преобладали тоналит-трондьемиты и, возможно, вулканы андезит-дацитового состава. Об этом свидетельствуют высокие содержания  $\text{SiO}_2$ , высокие отношения  $\text{Zr}/\text{Y}$ , фракционированные спектры распределения РЗЭ. Это же подтверждается преобладанием тоналит-трондьемитов в гальках полимиктовых конгломератов. Заметная роль базальтов в области размыва отражена в высоких (>0.60 мас. %) содержаниях  $\text{TiO}_2$ , а подчиненная роль коматиитов – в умеренных содержаниях  $\text{Cr}$ , наиболее низких в терригенных породах Водлозерского домена. В целом данный вывод согласуется с выводами Р.И. Милькевич и Т.А. Мысковой (1998), которые в качестве источников сноса для метатерригенных пород Костомукшской и Большеозерской структур рассматривали породы ТТГ-ассоциации (до 70%) и базальты Костомукшской зеленокаменной структуры (около 30%) с добавлением до 5% коматиитового материала.

Ведущая роль средне-кислых пород в источниках сноса в какой-то мере подтверждается серией парных диаграмм (рис. 6, 7). Однако они исходно построены и используются для глиноземистых осадочных пород и не отражают соотношение разных пород в источнике сноса. В большей степени это может отражать диаграмма  $\text{Cr}/\text{Ti}-\text{Zr}/\text{Y}$  (Samire et al., 1993) (рис. 8). Она является наиболее информативной для сравнения архейских терригенных пород Карельской провинции, так как они, с одной стороны, преимущественно представлены метаграувакками с невысокой степенью зрелости, а с другой стороны, участвуют в строении гранит-зеленокаменных областей, сложенных почти исключительно породами ТТГ-ассоциации с подчиненными вулканидами зелено-

каменных поясов – базальтами, андезито-дацитами, коматиитами, заметно различающимися по содержаниям соответственно  $\text{Zr}$ ,  $\text{Ti}$  и  $\text{Cr}$ . Наши попытки использовать разные тройные диаграммы, отражающие вклад разных источников, например  $\text{Ti}-\text{Zr}-\text{Cr}$ , не увенчались успехом. В то же время диаграмма  $\text{Cr}/\text{Ti}-\text{Zr}/\text{Y}$  в том виде, в каком ее использовали Г. Кэмайр с соавторами (Samire et al., 1993) и Р.И. Милькевич с Т.А. Мысковой (1998), в нашем случае позволяет дать лишь приблизительную оценку соотношения пород в области сноса в связи с существенными вариациями состава самих пород-источников в разных районах или фрагментах коры. Это видно на рис. 8, где показаны поля, образованные средними составами базальтов и коматиитов разных зеленокаменных структур, а также тоналитов, расположенных вблизи от этих структур. Такие поля в сочетании с разным соотношением пород-источников приводят к значительным разбросам составов терригенных пород на диаграмме. Особенно наглядно это видно на примере метаграувакк района Иломанси, где в качестве одного из источников обломочного материала могли быть расположенные непосредственно к востоку тоналиты и трондьемиты района оз. Суоярви в Западной Карелии, характеризующиеся очень низкими содержаниями  $\text{Y}$ , в отличие от тоналит-трондьемитов других доменов (Чекулаев и др., 2018).

При этом на рис. 8 видно, что практически все рассматриваемые метаграувакки представляют смесь двух источников сноса: (1) тоналит-трондьемитов, в основном слагающих фундамент зеленокаменных поясов, и (2) базальтов, участвующих в строении этих поясов, при весьма незначительной роли коматиитов и базальтовых коматиитов. Что касается средне-кислых вулканических поясов в качестве источников кластического материала, то их вклад может быть просто суммирован с вкладом



**Рис. 6.** Положение фигуративных точек составов архейских метатерригенных пород Карельской провинции на дискриминационных диаграммах (а) La/Sc–Th/Co для магматических пород кислого (поле 1) и основного (поле 2) состава и (б) Hf–La/Th для толеитов океанических островов (поле 1), андезитов островных дуг (поле 2) и зрелой континентальной коры (поле 3). Поля составов различных источников по (Ножкин и др., 2010). Условные обозначения см. на рис. 4.

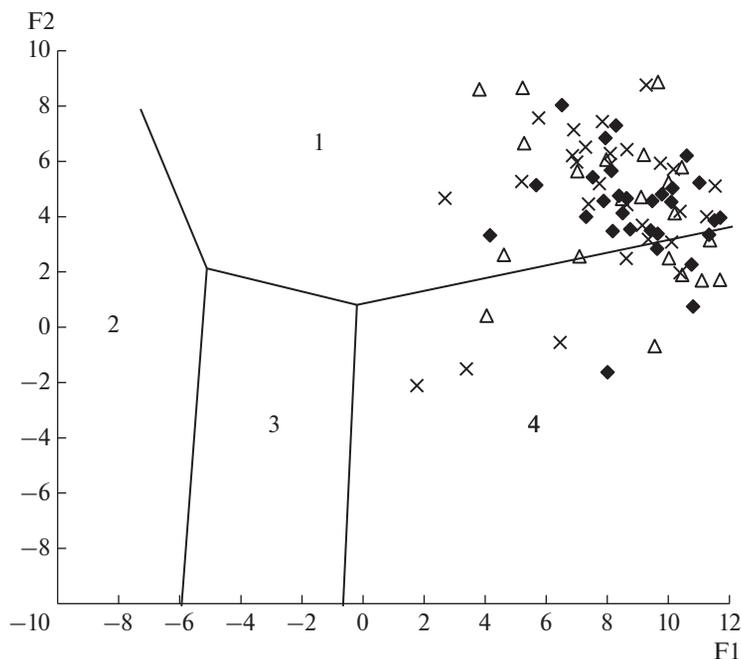
пород ТТГ-ассоциации, так как нами было показано сходство составов этих групп пород в разных доменах провинции (Чекулаев и др., 2018).

Для оценки состава источников сноса для терригенных пород из разных структур всех трех доменов нами использованы средние содержания ряда главных, редких и редкоземельных элементов не только в терригенных породах, но также в близлежащих тоналит-трондьемитах и в базальтах зеленокаменных структур с нанесением этих данных на спайдер-диаграммы (рис. 9).

На рис. 9а показаны средние составы терригенных пород и базальтов Костомукшской зеленокаменной структуры и тоналит-трондьемитов окружающей структуры, а также расположенного непосредственно к северу района пос. Вокнаволок. Четко видно сходство тоналит-трондьемитов обоих районов и близость к ним по составу осадочных пород Костомукши.

Влияние базальтового источника сказывается лишь на содержаниях Ti, Y и тяжелых РЗЭ. Это указывает на то, что именно вмещающие структуру тоналит-трондьемиты были главным источником обломочного материала для терригенных пород названной структуры. Этому выводу противоречат Sm–Nd изотопные данные. Согласно им, модельный возраст  $t_{Nd(DM)}$  терригенных пород Костомукшской структуры составляет 2.7–2.8 млрд лет, а  $t_{Nd(DM)}$  вмещающих гранитоидов и средне-кислых вулканитов равен 2.8–3.0 млрд лет (Лобач-Жученко и др., 2000а). Возможным объяснением этого противоречия может быть наличие в источнике сноса более молодых тоналит-трондьемитов Центрально-Карельского домена.

Терригенные породы пояса Кухмо–Суомусалми–Типасъярви по составу близки тоналит-



**Рис. 7.** Положение фигуративных точек составов архейских метатерригенных пород Карельской провинции на дискриминационной диаграмме F1–F2 (Roser, Korsch, 1988). Поля: 1 – богатые кварцем осадочные образования; 2–4 – магматические породы основного (2), среднего (3) и кислого (4) состава. Условные обозначения см. на рис. 4.

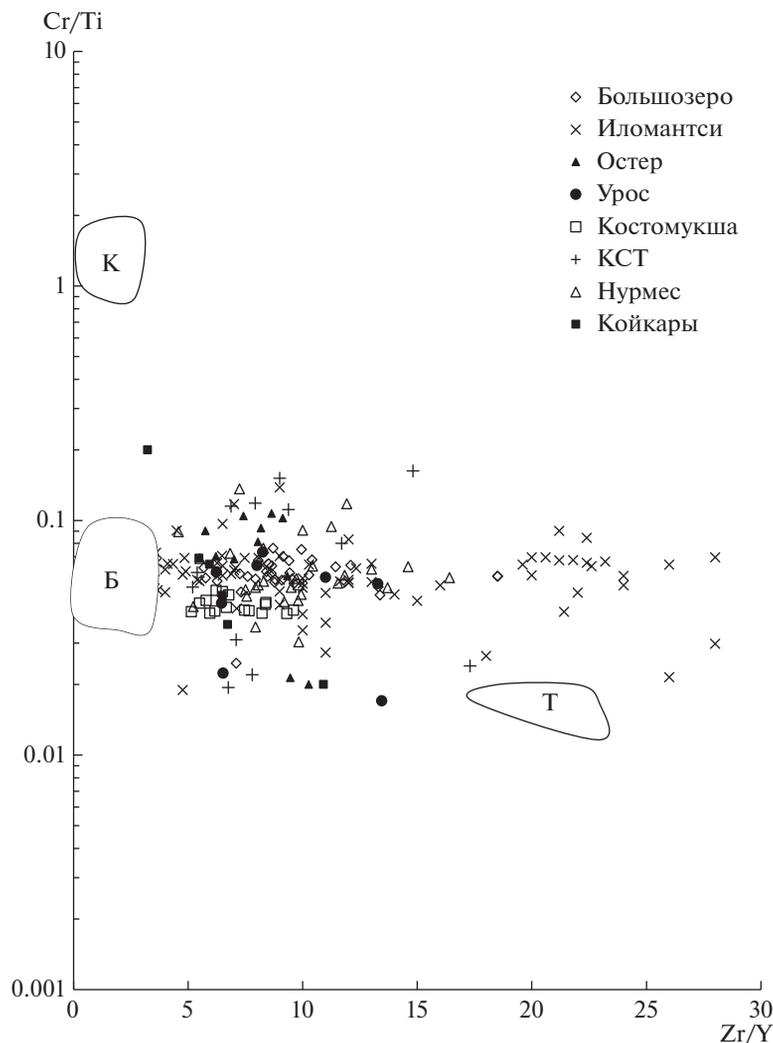
трондьемитам, окружающим пояс (рис. 9б). К ним близки и более молодые парагнейсы пояса Нурмес, которые отличаются более высоким содержанием Sr и более низкими концентрациями TRЗЭ, что может указывать на присутствие в их источнике сноса тоналит-трондьемитов Центрально-Карельского домена с подобными особенностями состава (Чекулаев и др., 2018). Это подтверждается низким модельным возрастом  $t_{Nd(DM)}$  терригенных пород структуры Кухмо, не превышающим 2.8 млрд лет (Nuhma et al., 2012a).

В пределах Центрально-Карельского домена хорошо изучены геохимически метаграувакки структур Иломантси и Большозеро, средние составы которых приведены в табл. 2 и на диаграмме рис. 9в. На рисунке видно большое сходство составов метаграувакк этих структур, что подтверждает высказанное ранее предположение (Чекулаев и др., 2005) о принадлежности структур к единому зеленокаменному поясу. Спайдер-диаграмма (рис. 9в), построенная с использованием среднего состава тоналит-трондьемитов Центрально-Карельского домена, показывает близость составов гранитоидов и терригенных пород, что указывает на тоналит-трондьемиты как возможный источник сноса. В качестве второго источника обломочного материала вполне могли быть базальты структуры Иломантси, в целом сходные с базальтами пояса Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви. Это находится в согласии с Sm–Nd изотопными данными. Все полученные

значения  $t_{Nd(DM)}$  терригенных пород и средне-кислых вулканитов рассматриваемых структур и прилегающих к ним с востока тоналит-трондьемитов находятся в интервале 2.7–2.9 млрд лет (Nuhma et al., 2012a). Влияние базитового источника отражено в содержаниях Ti, Y и тяжелых РЗЭ. Причиной положительной Nb-аномалии в базальтах и Иломантси, и пояса Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви, в отличие от вулканитов других архейских структур Карелии, является, скорее всего, систематическая аналитическая ошибка, что уже отмечалось ранее (Чекулаев и др., 2018).

Терригенные породы Сегозерской структуры отчетливо сходны по составу с вмещающими структуру тоналит-трондьемитами (рис. 9г). Очевидно, что эти гранитоиды были главным источником сноса, что не противоречит Sm–Nd изотопным данным:  $t_{Nd(DM)}$  терригенных пород и средне-кислых вулканитов Сегозерской структуры и тоналит-трондьемитов, развитых к северо-западу от нее, не выше 2900 млн лет, то есть возраст терригенных пород и вероятных источников сноса не превышает 2.9 млрд лет (Чекулаев и др., 2005, 2018). Влияние базальтового источника сказалось, как и в предыдущих случаях, на содержании в терригенных породах Ti, Y и тяжелых РЗЭ.

Составы пород зеленокаменных структур Палая Ламба и Уросозерская показаны на одной диаграмме (рис. 9д), так как эти структуры близко расположены, но в первой отсутствуют терригенные породы, а для второй нет данных по составу вмещающих пород.



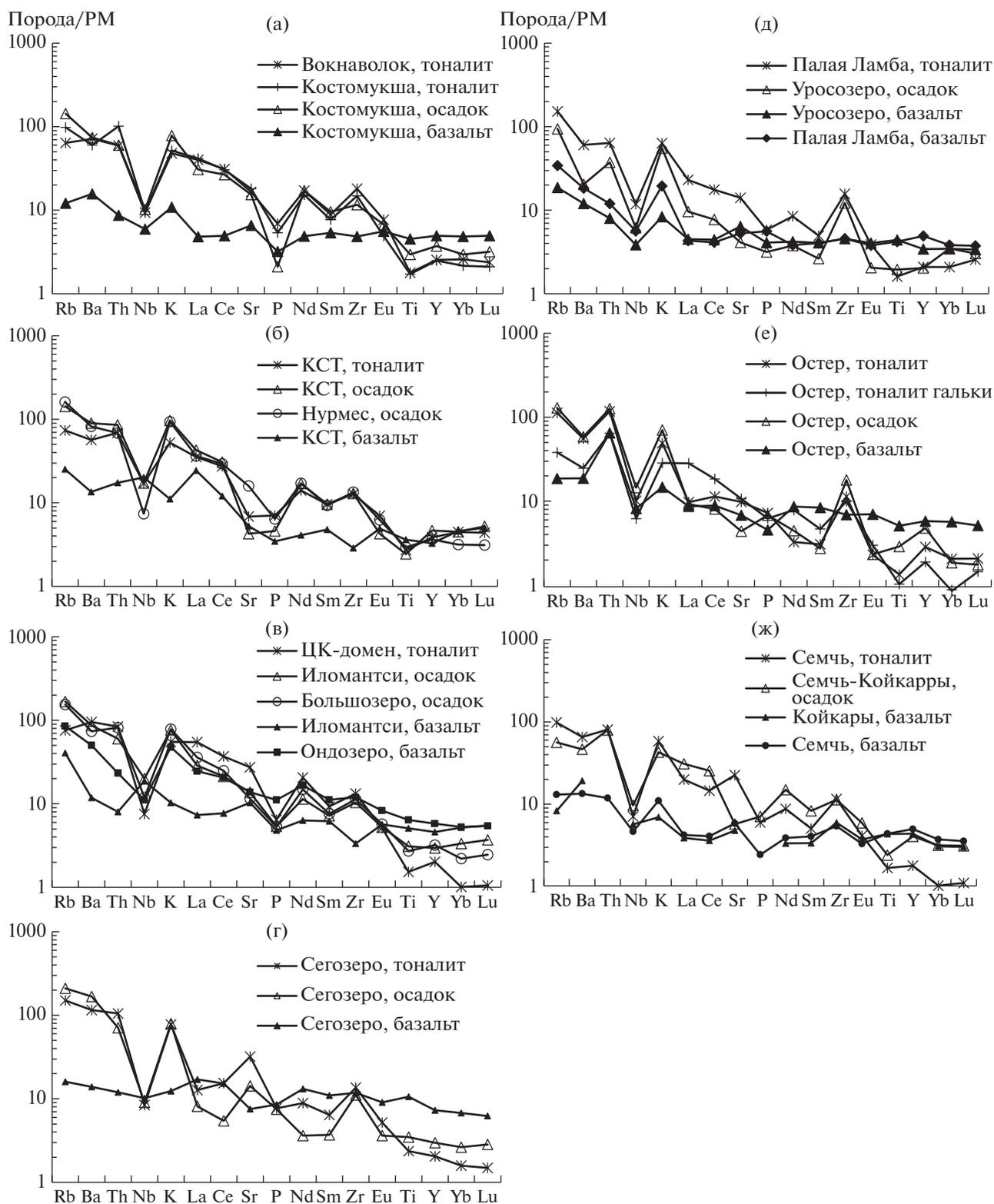
**Рис. 8.** Диаграмма Zr/Y–Cr/Ti для архейских метатерригенных пород Карельской провинции. Показаны поля средних составов коматиитов (К), базальтов (Б) и тоналитов (Т) в разных районах и структурах. КСТ – Кухмо–Суомуссалми–Типасъярви.

щающих гранитоидов. Диаграмма показывает преобладание в источниках сноса тоналит-трондьемитов, близких по составу к таковым Палой Ламбы, и отчетливое сходство базальтов этих структур, роль которых как источника материала для осадочных пород не столь заметна. Связь терригенных пород и тоналит-трондьемитов подтверждается их близкими модельными возрастaми  $t_{Nd(DM)}$  от 3.25 до 3.6 млрд лет (Ранний..., 2005), характерными для большинства структур Водлозерского домена.

Неожиданным оказался результат сравнения составов пород района оз. Остер (рис. 9е). Состав терригенных пород Остерской структуры сходен с составом тоналитов, участвующих в строении структуры в южной части района (Чекулаев и др., 2002), но отличается от состава тоналит-трондьемитов, представленных в гальках конгломератов, слагающих вместе с метаграувакками единую терригенную толщу. К сожалению, прояснить этот во-

прос не могут данные по изотопному составу Sm и Nd, так как, во-первых, они пока отсутствуют для осадочных пород Остера, а во-вторых, для всех других пород этого района, включая плагиопорфиры, секущие терригенную толщу, значения модельного возраста  $t_{Nd(DM)}$  превышают 3.0 млрд лет (Лобач-Жученко и др., 2000б), тогда как возраст толщи значительно меньше 2.86 млрд лет (Арестова и др., 2017).

Средний состав терригенных пород района Семчь–Койкары заметно отличается от состава тоналит-трондьемитов обрамления Семченской зеленокаменной структуры (рис. 9ж). Влияние гранитоидов подтверждается лишь содержанием литофильных элементов и легких РЗЭ, за исключением Sr. Гораздо большее влияние на состав терригенных пород оказали базальты Семченской и Койкарской структур, что видно также из табл. 1 и 2. Изотопный состав Sm и Nd в терригенных породах скорее свидетельствует о разно-



**Рис. 9.** Мультиэлементные диаграммы содержания редких и редкоземельных элементов в архейских метатерригенных породах, тоналит-грандземитах и базальтах, нормированные на примитивную мантию РМ по (Sun, McDonough, 1989), для районов: Костомукша (а), Кухмо—Суомуссалми—Типасьярви (б), Большозеро—Иломантси (в), Сегозеро (г), Уросозеро—Палая Ламба (д), Остер (е), Койкарры—Семч (ж). КСТ — Кухмо—Суомуссалми—Типасьярви, ЦК домен — Центрально-Карельский домен.

возрастных и разных по составу источниках сноса, что отражают значения  $t_{Nd(DM)}$  в терригенных породах, составляющие около 2.8 и 3.48 млрд лет (неопубликованные данные Р.И. Милькевич).

Таким образом, состав терригенных пород во всех изученных зеленокаменных структурах отражает ведущую роль в источнике сноса пород тоналит-грандьемитовой ассоциации. Влияние базитового источника сказывается исключительно на содержаниях в породах Ti, Y и тяжелых РЗЭ. Очевидно, что почти во всех зеленокаменных структурах источниками кластики для терригенных пород являлись пространственно приуроченные к ним тоналит-грандьемиты и базальты. Коматииты, как источник обломочного материала, не играли заметной роли, что отмечалось раньше (Милькевич, Мыскова, 1998).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ геологии и состава архейских метатерригенных пород Карельской провинции Балтийского щита с целью определения времени их образования, положения в строении зеленокаменных поясов и основных источников сноса. Показано, что терригенные породы в наибольшем объеме присутствуют в зеленокаменных поясах Центрально-Карельского домена, где они совместно с вулканитами средне-кислого состава слагают их основную часть, залегают в основании разрезов и имеют возраст около 2750 млн лет.

В поясах Западно-Карельского домена терригенные породы слагают верхние части разрезов, в заметном объеме присутствуют только в разрезе Костомукшской структуры и имеют возраст около 2745–2750 млн лет.

Геологическое положение и возраст метатерригенных пород в поясах Водлозерского домена не всегда можно определить из-за сложного строения поясов и отсутствия определений их возраста. Имеющиеся геологические данные позволяют предполагать для терригенных пород этого домена также неоархейский возраст. В результате установлено, что терригенные породы начинают неоархейский этап корообразования Карельской провинции.

Согласно геохимическим данным и положительным ( $>0$ ) значениям  $DF(x)$ , в составе архейских терригенных пород преобладают метаграувакки. В пределах всех трех доменов имеются зеленокаменные структуры, где в основании разрезов присутствуют полимиктовые конгломераты, гальки которых представлены преимущественно породами тоналит-грандьемитового состава с подчиненным количеством магматических пород разного состава.

Химический состав метатерригенных осадочных пород (низкие содержания CaO и Na<sub>2</sub>O и низкие значения химического индекса изменения CIA  $< 55$ ) указывает на незначительную степень выветрива-

ния. Содержания редких и редкоземельных элементов (Co, Sc, Hf, La) свидетельствуют о том, что во всех изученных зеленокаменных структурах ведущую роль среди пород питающих провинций играли породы тоналит-грандьемит-гранодиоритовой ассоциации. Влияние базитового источника было значительно меньшим и сказалось исключительно на содержаниях в метатерригенных осадочных породах Ti, Y и тяжелых РЗЭ. Коматииты как источник обломочного материала не играли заметной роли.

Источниками сноса для метатерригенных осадочных пород являлись окружающие тоналит-грандьемиты и вулканиты зеленокаменных поясов.

**Благодарности.** Авторы благодарны Е.С. Богомолу (ИГГД РАН) за измерение изотопного состава Sm и Nd в породах, а также С.А. Светову (КарНЦ РАН) и Т.А. Мысковой (ИГГД РАН) за предоставленную возможность использования полученных ими аналитических данных.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Кучеровский Г.А., Егорова Ю.С., Скублов С.Г. О соответствии геологических данных и результатов датирования архейских пород U–Pb методом по циркону на примере Карельской провинции Балтийского щита // Региональная геология и металлогения. 2017. № 71. С. 5–22.
- Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Лобач-Жученко С.Б., Кучеровский Г.А. Корреляция процессов формирования архейской коры древнего Водлозерского домена, Балтийский щит // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 2. С. 1–13.
- Арестова Н.А., Чекулаев В.П., Матвеева Л.В., Кучеровский Г.А., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. Новые данные о возрасте архейских пород Водлозерского домена (Балтийский щит) и их значение для геодинамических реконструкций // Докл. АН. 2012. Т. 442. № 1. С. 67–73.
- Арестова Н.А., Юрченко А.В., Чекулаев В.П., Лобач-Жученко С.Б., Кучеровский Г.А., Лепехина Е.Н. Уросозерская зеленокаменная структура (Фенноскандинавский щит): геологическое строение, возраст, состав и метаморфизм вулканитов // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Геология докембрия. 2016. № 2. С. 28–39.
- Великославинский С.Д., Глебовицкий В.А., Крылов Д.П. Разделение силикатных осадочных и магматических пород по содержанию петрогенных элементов с помощью дискриминационного анализа // Докл. АН. 2013. Т. 453. № 3. С. 310–313.
- Геология и петрология архейского гранитно-зеленокаменного комплекса Центральной Карелии. Ред. Кратц К.О. Л.: Наука, 1978.
- Гилярова М.А. Стратиграфия, структуры и магматизм восточной части Балтийского щита. Л.: Изд-во ЛГУ, 1974.
- Глебова-Кульбах Г.О., Лобач-Жученко С.Б., Пинаева Н.И., Борисова К.Д. Граниты Южной Карелии // Граниты Кольского полуострова и Карелии. Труды ЛАГЕД. 1963. Вып. 15. С. 161–334.

- Кожевников В.Н.* Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2000.
- Кожевников В.Н., Бережная Н.Г., Пресняков С.Л., Лепёхина Е.Н., Антонов А.Н., Сергеев С.А.* Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических и геодинамических реконструкциях // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2006. Т. 14. № 3. С. 19–40.
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н., Граунов О.В.* Литогеохимия тонкозернистых обломочных пород венда Непского свода Сибирской платформы // Литосфера. 2016. № 1. С. 74–87.
- Кучеровский Г.А., Арестова Н.А.* Геология, петрология и возраст габбро-анортозитов района оз. Остер (Водлозерский домен, Карельская провинция) // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 24–37.
- Левченко О.А., Богданов Ю.Б., Матреничев В.А., Сава-тенков В.М., Яковлева С.З., Макеев А.Ф.* О положении границы архея и протерозоя в Карелии // Докл. АН. 2000. Т. 377. № 3. С. 1–3.
- Лобач-Жученко С.Б., Арестова Н.А., Милькевич Р.И., Левченко О.А., Сергеев С.А.* Стратиграфический разрез Костомукшской структуры Карелии (верхний архей), реконструированный на основе геохронологических, геохимических и изотопных данных // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2000а. Т. 8. № 4. С. 3–10.
- Лобач-Жученко С.Б., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Левский Л.К., Коваленко А.В.* Архейские террейны Карелии: их геологическое и изотопно-геохимическое обоснование // Геотектоника. 2000б. № 6. С. 26–42.
- Матреничев А.В., Матреничев В.А., Каулина Т.В.* Геология и изотопный возраст вулканитов Хедозерской структуры // Геология и геоэкология: исследования молодых. Материалы XIX Конференции молодых ученых, посвященной памяти К.О. Кратца. Апатиты, 2008. С. 40–42.
- Милькевич Р.И., Мыскова Т.А.* Позднеархейские метатерригенные породы Западной Карелии (литология, геохимия, источники сноса) // Литология и полезн. ископаемые. 1998. № 2. С. 177–194.
- Неелов А.Н.* Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканических пород. Л.: Наука, 1980.
- Ножкин А.Д., Дмитриева Н.В., Туркина О.М., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л.* Метапелиты нижнего докембрия Енисейского кряжа: РЗЭ-систематика, источники сноса, палеогеодинамика // Докл. АН. 2010. Т. 434. № 6. С. 796–801.
- Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России. Объяснительная записка. Ред. Митрофанов Ф.П., Негруца В.З. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 13 с.
- Овчинникова Г.В., Матреничев В.А., Левченко О.А., Сергеев С.А., Яковлева С.З., Гороховский Б.М.* U–Pb и Pb–Pb изотопные исследования кислых вулканитов Хаутаваарской зеленокаменной структуры, Центральная Карелия // Петрология. 1994. № 3. С. 266–281.
- Петтиджон Ф.Д.* Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 751 с.
- Раевская М.Б., Горьковец В.Я., Светова А.И., Володичев О.И.* Стратиграфия докембрия Карелии // Опорные разрезы верхнеархейских отложений. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 191 с.
- Ранний докембрий Балтийского щита. Ред. Глебовицкий В.А. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Самсонов А.В., Берзин Р.Г., Заможняя Н.Г., Щипансуий А.А., Бибикина Е.В., Кирнозова Т.И., Конилов А.Н.* Процессы формирования раннедокембрийской коры северо-запада Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований // Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь–Калевала. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 109–143.
- Самсонов А.В., Бибикина Е.В., Пухтель И.С., Щипанский А.А., Журавлев Д.З.* Изотопные и геохимические различия кислых вулканических пород зеленокаменных поясов Карелии и их геотектоническое значение // Корреляция геологических комплексов Фенноскандии. 1-я Международная конференция. Тез. докл. Санкт-Петербург, 1996. С. 74–75.
- Светов С.А., Светова А.И.* РЗЭ-систематика верхнеархейских осадочных парагенезисов центральной Карелии // Докл. АН. 2004. Т. 394. № 3. С. 1–6.
- Светов С.А., Хухма Х.* Геохимия и Sm–Nd изотопное изучение архейских коматиит-толеитовых ассоциаций Веллозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Центральная Карелия) // Докл. АН. 1999. Т. 369. С. 261–263.
- Светова А.И., Светов С.А., Назарова Т.Н.* Полимодальные граувакки – индикаторы конвергентных режимов в архее // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2001. Вып. 4. С. 36–47.
- Хейсканен К.И., Голубев А.И., Бондарь Л.Ф.* Орогенный вулканизм Карелии // Труды Ин-та геологии Кар. ФАН СССР. 1977. Вып. 36. 216 с.
- Чекулаев В.П.* Особенности структурно-метаморфической эволюции зеленокаменных поясов. Деформации и метаморфизм лопийских образований Западной Карелии // Зеленокаменные пояса фундамента Восточно-Европейской платформы (геология и петрология вулканитов). Л.: Наука, 1988. С. 62–68.
- Чекулаев В.П., Лобач-Жученко С.Б., Арестова Н.А., Коваленко А.В., Гусева Н.С.* Архейский магматизм северо-западной окраины древнего Водлозерского домена, район оз. Остер (геология, геохимия, петрология) // Петрология. 2002. Т. 10. № 2. С. 138–167.
- Чекулаев В.П., Левченко О.А., Иваников В.В., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Коваленко А.В., Гусева Н.С., Комаров А.Н.* Состав, возраст и Sm–Nd систематика архейских высокомагнезиальных гранитоидов (санукитоидов) Панозерского массива, Карелия // Геохимия. 2003. № 8. С. 812–828.
- Чекулаев В.П., Баянова Т.Б., Арестова Н.А., Коваленко А.В., Левкович Н.В.* О возрасте высоко-Mg гранитоидов Ньюкозерского массива, Карелия // Докл. АН. 2004. Т. 394. № 1. С. 101–104.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Коваленко А.В., Слабунов А.И.* Карельская гранит-зеленокаменная область. Центральная-Карельский домен // Ранний докембрий Балтийского щита (Ред. Глебовицкий В.А.). СПб.: Наука, 2005. С. 395–471.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С., Кучеровский Г.А.* Изменение условий формирования коры Карельской провинции Балтийского щита при переходе от мезо- к неорхее: результаты геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 26. № 3. С. 3–23.
- Bhatia M.R.* Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones // J. Geol. 1983. V. 91. P. 611–627.
- Bibikova E., Petrova A., Claesson S.* The temporal evolution of the sanukitoids in the Karelian Craton, Baltic Shield: an ion microprobe U–Th–Pb isotopic study of zircons // Lithos. 2005. V. 79. P. 129–145.

- Bonjour J.L., Dabard M.P.* Ti/Nb ratios of clastic terrigenous sediments used as an indicator of provenance // *Chem. Geol.* 1991. V. 91. P. 257–267.
- Camire G.E., Lafleche M.R., Ludden J.N.* Archean metasedimentary rocks from the northwestern Pontiac Subprovince of the Canadian Shield: chemical characterization, weathering and modeling of the source areas // *Precambrian Res.* 1993. V. 62. № 3. P. 285–305.
- Fralick N., Hollings P., Metsaranta R., Heaman L.M.* Using sediment geochemistry and detrital zircon geochronology to categorize eroded igneous units: an example from the Mesoarchean Birch-Uchi Greenstone Belt, Superior province // *Precambrian Res.* 2009. V. 168. P. 106–122.
- Huhma H., Kontinen A., Mikkola P., Halkoaho T., Hokkanen T., Hölttä P., Juopperi H., Konnunaho J., Luukkoneh E., Mutanen T., Peltonen P., Pietikäineh K., Pulkkinen A.* Nd isotopic evidence for Archean crustal growth in Finland // *Geol. Surv. Finland. Spec. Pap.* 2012a. V. 12. P. 175–212.
- Huhma H., Manttari I., Peltonen P., Kontinen A., Halkoaho T., Hanski E., Hokkanen T., Hölttä P., Juopperi H., Konnunaho J., Lahaye Y., Luukkoneh E., Pietikäineh K., Pulkkinen A., Sorjonen-Ward P., Vaasjoki M., Whitehouse M.* The age of the Archean greenstone belts of Finland // *Geol. Surv. Finland. Spec. Pap.* 2012b. V. 12. P. 73–174.
- Kontinen A., Капыао А., Huhma H., Karhu J., Matukov D.I., Larionov A., Sergeev S.A.* Nurmes paragneisses in eastern Finland, Karelian craton: provenance, tectonic setting, and implications for Neoproterozoic craton correlation // *Precambrian Res.* 2007. V. 152. P. 119–148.
- Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature.* 1982. V. 299. P. 715–717.
- O'Brien H., Huhma H., Sorjonen-Ward P.* Petrogenesis of the late Archean Hattu schist Belt, Ilomantsi, Eastern Finland: geochemistry and Sr, Nd isotopic composition // *Geol. Surv. Finland. Spec. Pap.* 1993. V. 17. P. 147–184.
- Papunen H., Halkoaho T., Luukkonen E.* Archean evolution of the Tipasjarvi-Kuhmo-Suomussalmi Greenstone Complex, Finland // *Geol. Surv. Finland Bull.* 2009. V. 403. 68 p.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and Sandstone. N.-Y.: Springer-Verlag, 1973.
- Puchtel I.S., Hofmann A.W., Jochum K.P., Mezger K., Shchipansky A.A., Samsonov A.V.* The Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield: remnant of a late Archean oceanic plateau? // *Terra Nova.* 1997. № 9. P. 87–90.
- Roser B.P., Korsch R.J.* Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // *Chem. Geol.* 1988. V. 67. P. 119–139.
- Samsonov A.V., Puchtel J.S., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z.* Petrology and geochronology of felsic volcanic and plutonic rocks of the Kostomuksha greenstone belt, W. Karelia // *Precambrian of Europe: stratigraphy, structure, evolution and mineralization. MAEGS 9. Abstracts.* St. Petersburg, 1995. P. 98.
- Samsonov A.V., Bogina M.M., Bibikova E.V., Petrova A.Ju., Shchipansky A.A.* The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: implications for tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield // *Lithos.* 2005. V. 79. P. 83–106.
- Sun S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins.* Eds. Saunders A.D., Norry M.J. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. V. 42. P. 313–345.
- Vrevsky A.B., Matrenichev V.A., Svetov S.A.* Petrology of komatiites and geochemical composition of their sources: implications for Archean mantle plume evolution of the Baltic shield // *SVEKALAPKO Europrobe Project. Abstracts.* St. Petersburg, 1998. P. 68–69.

Рецензенты А.Б. Котов, А.В. Маслов

## Archean Metaterrogenous Rocks of the Karelian Province: Geological Situation, Geochemistry, Sources of Sediments

V. P. Chekulaev<sup>a, #</sup> and N. A. Arestova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St.-Petersburg, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: vpchekulaev@mail.ru*

The geology and composition of Archean terrigenous sedimentary rocks of the Karelian province of the Baltic Shield were studied with the aim of establishing their position in the structure of greenstone belts and their role in the composition of demolition sources. It has been shown that metaterrogenous rocks of the greenstone belts of the youngest Central Karelian domain together with medium and acid volcanics form the main part of the sections, confined to their base and are about 2745 Ma old. In the belts of the West Karelian domain metaterrogenous rocks compose the upper parts of the sections, and their age is 2745–2750 Ma. Geological data on the position of metaterrogenous rocks in the belts of the most ancient Vodlozersky domain also suggest their Neoproterozoic age. On this basis, it is concluded that metaterrogenous rocks begin the Neoproterozoic stage of crust formation in the Karelian province. According to geochemical data, metagracuvacchi prevail in the Archean metaterrogenous rocks of all three domains. At the base of sections of some structures polymict conglomerates are present with a predominance of tonalite, trondjemite and less granodiorite pebbles association) and a subordinate number of igneous rocks of different composition. Low CaO and Na<sub>2</sub>O contents and chemical index CIA values <55 indicate a slight degree of weathering. The contents of Th, Co, Sc, Hf, La indicate that in all the studied structures the TTG association rocks played a leading role in the composition of the sources. The influence of the basic source is small and affected exclusively the contents of Ti, Y and heavy REE in metaterrogenous rocks. Komatiites as a source of detrital material did not play a significant role.

**Keywords:** Baltic Shield, Karelian province, Archean, metaterrogenous rocks, geology, chemical composition, sources of sediments